

Planeamento de Produção Integrado com Sistema de Gestão e Controlo de Produção (MES)

Nuno Alexandre Vitorino Fernandes

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Luís Filipe Ribeiro dos Santos Guimarães



Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial

2017-06-24

Resumo

A crescente competitividade e concorrência a nível dos mercados leva a que as organizações industriais se tenham de adaptar a um ambiente que é mais exigente, ao nível da qualidade dos produtos e da reatividade do serviço. Muitas procuram o auxílio de sistemas de apoio à produção, para poderem cumprir estas condições, entre os quais os *Manufacturing Execution Systems (MES)*. Estes sistemas visam a integração e a informatização dos processos da empresa, caminhando-se cada vez mais para uma abordagem holística no momento da tomada de decisão.

Tendo o processo de planeamento de produção uma importância fulcral, em qualquer indústria, o presente projeto visou estudar a viabilidade da integração de uma ferramenta de planeamento de produção a curto/médio prazo, orientado a ambientes produtivos *Make-to-Order*, num sistema de *MES*. Esta meta impôs uma dualidade de requisitos: a necessidade de conjugar um planeamento a nível tático, com uma precisão em termos da manutenção de um fluxo contínuo de produção com níveis reduzidos de *stock*.

Para a construção deste sistema, procedeu-se à recolha e construção de um caso de estudo de um cliente-tipo, da Critical Manufacturing, na indústria de semicondutores. Com base nos requisitos e desafios encontrados, foram criados modelos de programação matemática que retratassem a realidade aí experienciada. Estes foram integrados num sistema de planeamento hierárquico, articulando o planeamento a médio prazo com o planeamento a um nível mais operacional. Assim sendo, foi possível atingir-se o objetivo de, por um lado, obter uma visão global da produção e, por outro, saber quais as datas em que cada componente deve ser lançado na linha de produção.

Uma futura implementação de um sistema de planeamento de produção no MES implicou um esforço adicional, para além da simples validação dos resultados obtidos para um cliente específico. De um ponto de vista, foi estudada a interligação entre o processo de planeamento e a estrutura de dados do MES, quer através da inclusão de dados já presentes, quer pela sugestão de novas estruturas a serem incluídas à sua base de dados, no futuro. Noutra perspetiva, focando-se a diversidade de clientes/indústrias, em que este produto é aplicado, houve uma busca de garantir a robustez do processo de planeamento face a *inputs* variáveis, através da identificação das características fundamentais partilhadas pelos diferentes clientes. Decorrente deste esforço, a ferramenta proposta possui uma aplicabilidade coerente com o objetivo de uma futura comercialização deste serviço.

Production Planning Integrated With Production Management and Execution System (MES)

Abstract

As markets become more and more competitive and competition between companies reaches higher levels, industries are pressured to adapt to a more demanding environment, by increasing the quality of their products and the responsiveness of the service offered. As such, many companies turn to decision support systems to keep up with the market's requirements, software such as the Manufacturing Execution Systems (MES). These systems aim at integrating and computerizing more and more of the company's processes, in the end giving a holistic approach to decision-making processes.

Of these processes, production planning is of the utmost importance for an efficient allocation of available resources. As such, this project studied the possibility of integrating a mid-term manufacturing planning module for companies working in a Make-to-Order fashion in a MES. This meant that the overall objective would have to be divided into two parts: having a production planning system on the tactical level that would, nonetheless, consider the need of maintaining a continuous flow through the shop floor, limiting the systems reliance on inventory.

The first step for the construction of the proposed system was the gathering of information of one of Critical Manufacturing's clients, a semiconductor company, representative of CMF's customer portfolio. Next, accurate mathematical programming models were developed to portrait the situation described in the mentioned case study. Lastly, these were integrated into a hierarchical planning system, articulating mid-term planning with operational planning/execution. Therefore, it became possible to obtain an overview of production and to determine which moment each component should be launched in the production process.

The long-term goal for a future integration of the production planning system in the MES system meant an additional effort beyond simply tailoring this system to a specific client. Firstly, it was necessary to evaluate the data structure of the MES, analyzing which of the already present data would be included in the planning process, and which additional structures would have to be created to support it. In addition, the diversity of the companies/industries in which the MES is applied entailed an additional effort to guaranty the solidity of the process when the inputs are variable. This was achieved by identifying which structural traits were shared by the different costumers. As such, the proposed solution has an applicability adequate to a future commercialization of this service.

Agradecimentos

A execução deste projeto nunca teria sido possível sem o apoio e a participação de diversas pessoas, às quais gostaria de expressar a minha gratidão.

Em primeiro lugar, gostaria de manifestar a minha gratidão ao Engenheiro Pedro Rodrigues, quer pelo seu acompanhamento e disponibilidade constantes, para a resolução dos problemas que surgiram, pelo seu apoio e entusiasmo efusivos pela realização do projeto, quer pelo seu sentido de humor e otimismo face às contrariedades. Agradeço, também, ao Engenheiro Luís Ponte e ao Engenheiro João Mimoso, pelos seus contributos e *know-how*, que tiveram sempre a amabilidade de partilhar.

O agradecimento é extensivo à administração da Critical Manufacturing, não só pelo apoio financeiro consubstanciado na bolsa atribuída, como pela oportunidade de encetar a minha primeira experiência laboral na área de engenharia, num ambiente tão desafiante e aberto a novas ideias.

Agradeço particularmente ao Professor Luís Guimarães, por toda a ajuda oferecida. Os seus contributos em momentos críticos do projeto impulsionaram-no no sentido do sucesso, lançando-o para objetivos mais ambiciosos do que os inicialmente previstos.

Um especial obrigado à minha mãe e ao meu pai, pelo apoio e paciência que sempre demonstraram e pelo incentivo que sempre me conseguiram transmitir.

Índice de Conteúdos

1. Introdução	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. A Critical Manufacturing	2
1.3. Objetivos do projeto	2
1.4. Método seguido no projeto.....	2
1.5. Estrutura da dissertação	3
2. Revisão da literatura	5
2.1. Planeamento da Produção.....	5
2.2. Hierarchical Production Planning (HPP).....	8
2.3. Planeamento em horizonte rolante	10
2.4. Desafios de planeamento na indústria de semicondutores <i>backend</i>	12
3. Caso de estudo e outros pressupostos.....	14
3.1. Caso de estudo - A empresa cliente	14
3.2. Caso de estudo - Processo produtivo	15
3.3. Caso de estudo - Dificuldades	19
3.4. Descrição do processo de planeamento atual	21
3.5. Interligação com o MES	22
3.6. Outros sistemas de planeamento presentes	24
4. Apresentação da solução.....	25
4.1. Planeamento tático – Médio prazo.....	25
4.2. Planeamento Operacional – Curto prazo	29
4.3. Planeamento hierárquico em horizonte rolante.....	35
4.3.1 Instrução.....	37
4.3.2 Avanço do planeamento detalhado	39
4.3.3 Reação	40
4.4. Alteração dos tempos de processamento	41
5. Resultados	43
5.1. Parâmetros.....	43
5.2. Cenário 1.....	44
5.3. Cenário 2.....	46
5.4. Cenário 3.....	47
6. Conclusões e trabalho futuro	48
6.1. Trabalho Desenvolvido.....	48
6.2. Resultados	49
6.3. Trabalho futuro	49
Referências	51
ANEXO A: Cenário 1 – Instrução	53
ANEXO B: Cenário 1 – Reação	55

ANEXO C: Fluxograma de operação da ferramenta de planeamento.....	57
---	----

Índice de Figuras

Figura 1 - Relações entre diferentes níveis de planeamento (Schneeweiß 1995)	9
Figura 2 – Implementação do planeamento hierárquico em horizonte rolante (Vogel, Almada-Lobo, and Almeder 2017).....	11
Figura 3 – Processo iterativo para a determinação de parâmetros de correção do modelo de alto nível (Guimarães 2015)	12
Figura 4 - Os quatro principais processos de fabrico de semicondutores (Mönch, Fowler, and Mason 2013)	12
Figura 5 – Principais passos do <i>backend</i> do processo de fabrico de semicondutores (Mönch, Fowler, and Mason 2013).....	13
Figura 6 - Dispersão das diferentes unidades da empresa cliente	14
Figura 7 - Diferentes linhas/departamentos de produção	15
Figura 8 - Linha de preparação das wafers.....	15
Figura 9 - Linha de preparação de wafers	15
Figura 10 - Linha de montagem dos <i>dies</i> . Note-se a relação com as restantes linhas de produção	16
Figura 11 - Linha de preparação do substrato	17
Figura 12 - Processo de preparação do composto de molde para integração no produto.....	18
Figura 13 - Estrutura de dados a usar no processo planeamento. Os retângulos a azul correspondem a estruturas/classes já presentes no MES, enquanto os retângulos a laranja são estruturas necessárias para o planeamento ainda não implementadas.....	22
Figura 14 - Possibilidade de extração de dados empíricos do MES para planeamento	23
Figura 15 - Erro cometido pelo planeamento detalhado a nível dos tempos de processamento superiores à granularidade escolhida.....	35
Figura 16 - Sistema de planeamento rolante proposto. Note-se que os planeamentos definidos a traço descontínuo serão iterações opcionais, tendo em conta a periodicidade definida para o planeamento agregado	36
Figura 17 - Instrução na primeira iteração.....	37
Figura 18 - Instrução na segunda iteração	39
Figura 19 - Utilização da iteração anterior do planeamento detalhado como <i>input</i>	40
Figura 20 - Reação do nível detalhado para o nível agregado.....	41
Figura 21 - Plano de Produção a Médio Prazo	46
Figura 22 - Fluxograma de funcionamento da ferramenta de planeamento	57

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Diferenças entre as características de diferentes níveis de planeamento (Almada Lobo 2005)	6
Tabela 2 - Classificação dos problemas de Planeamento de Capacidade (Almada-Lobo 2005).....	6
Tabela 3 - Parâmetros	44
Tabela 4 - Resultado da execução do algoritmo de otimização	45
Tabela 5 - Dados de performance da execução do algoritmo de otimização	45
Tabela 6 - Cumprimento das Encomendas	45
Tabela 7 - Cumprimento de objetivos a nível de planeamento detalhado.....	46
Tabela 8 - Comparação de cumprimento de objetivos entre os cenários 1 e 2.....	46
Tabela 9 - Cumprimento das metas de produção para a primeira semana de cada iteração do planeamento detalhado	47
Tabela 10 - Comparação entre a carteira de encomendas a executar no Cenário 1 e no Cenário 3	47
Tabela 11 - Instrução emitida pelo planeamento agregado na iteração 1	53
Tabela 12 - Instrução emitida pelo planeamento agregado na iteração 3.....	54
Tabela 13- Reação emitida pelo planeamento detalhado na iteração 2	55
Tabela 14 - Reação emitida pelo planeamento detalhado na iteração 4.....	55

1. Introdução

O presente relatório enquadra-se na Unidade Curricular de Dissertação, do 5º ano, 2º semestre do Mestrado Integrado de Engenharia e Gestão Industrial, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Este projeto de dissertação foi realizado em ambiente empresarial, na Critical Manufacturing, também designada por CMF.

Este capítulo serve como uma primeira apresentação do trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação. Será apresentada, em primeiro lugar, a motivação da investigação desenvolvida neste projeto, em particular, qual a necessidade a colmatar na empresa. Esta será também explicitada, dando-se especial ênfase ao produto por ela desenvolvido, considerando a sua relação com o desenvolvimento do atual projeto. Por fim, apresentam-se os objetivos visados, bem como a metodologia seguida para os alcançar.

1.1. Motivação

Este projeto visa o desenvolvimento de uma ferramenta de planeamento de produção, orientada a processos produtivos por *batches*, com alta exigência a nível de qualidade/rastreabilidade, nomeadamente, semicondutores, equipamentos médicos e a produção de painéis solares. Esta ferramenta surge como um complemento à oferta disponibilizada pela Critical Manufacturing (CMF), o Critical Manufacturing MES (*Manufacturing Execution System*), devendo, por isso, estar adequada às características dos seus clientes e ser capaz de interagir com o *software* comercializado pela empresa.

A inclusão de um módulo de planeamento de capacidade, na oferta da CMF, foi uma necessidade identificada no passado, por membros da equipa de implementação do produto, cujo contacto com o mercado, quer a nível de pedidos e requisitos de clientes já a utilizar o MES, quer em contactos com potenciais clientes, em feiras e congressos, levou à conclusão da sua imprescindibilidade para a manutenção da competitividade do produto no futuro.

Acentuou-se, com o passar dos anos, esta necessidade, sendo apontada como um benefício por uma multiplicidade de parceiros da CMF, desencadeando as primeiras tentativas ao nível de conceptualização da nova ferramenta. Em particular, destaca-se que foi um cliente em particular uma empresa de semicondutores *backend*, o agente que despoletou o desenvolvimento do projeto. Este cliente enfrentava dificuldades em agendar o lançamento de ordens de produção e o lançamento das necessidades, quer internas, a serem realizadas através de outros processos produtivos no interior da empresa, quer externas, a serem remetidas para um *software* de *Material Resource Planning* (MRP) que procederia à compra desses componentes. Tratando-se de um projeto relativamente recente, a CMF decidiu proceder a uma prova de conceito, com o intuito de detetar se é possível criar uma ferramenta que pudesse colmatar as expectativas deste cliente em particular.

Tendo em conta estes pressupostos, pretendeu-se uma solução que pudesse satisfazer os requisitos solicitados por esta empresa em particular, mas que, posteriormente, pudesse ser

extensiva a outros clientes, que se situem no mesmo segmento ou outros segmentos, com processos produtivos semelhantes. Efetivamente, com este alargamento, pretendia-se que a ferramenta pudesse, posteriormente, ser integrada com outras funcionalidades do MES, extraíndo-se todos os *inputs* necessários para o mesmo e, tomando os *outputs* fornecidos pelo planeamento da capacidade, permitisse, por exemplo, proceder ao escalonamento das operações.

1.2. A Critical Manufacturing

Este projeto decorreu na CMF, uma empresa dedicada à criação de uma solução para a gestão de produção em empresa, o Critical Manufacturing MES. Trata-se de um sistema virado para processos produtivos de empresas de maiores dimensões, em que os requisitos de qualidade, rastreabilidade e transparência são necessários. É um sistema modular, incluindo uma panóplia de funcionalidades que podem ser, ou não, empregues pelos clientes, dependendo das suas necessidades particulares. Adicionalmente, o sistema pode ser adaptado/customizado, tendo em conta alguma particularidade do contexto do cliente, que não tenha sido inicialmente contemplada na oferta existente. A empresa conta com três grandes divisões: o desenvolvimento do produto, a implementação no cliente e os serviços. Tendo este projeto, na raiz, um pedido de um dos clientes, foi a equipa de implementação, que faz a ponte entre as suas necessidades e a resposta dada pela empresa, a primeira a ponderar a possibilidade da inclusão deste módulo no produto e a propor a realização da prova de conceito, bem como a sugerir que informações estariam ou não disponíveis, do lado do cliente, para a construção da solução.

1.3. Objetivos do projeto

A meta final do projeto é a consecução de uma ferramenta capaz de otimizar a colocação de diversas ordens de produção para uma instalação com as características já explicadas. Estes objetivos implicam, por um lado, a criação e resolução de um modelo matemático, que irá detalhar os momentos em que cada lote de cada produto/componente deve ser lançado e os componentes externos que devem estar presentes na instalação.

Por outro lado, outra finalidade é obter vários indicadores da performance da ferramenta, com o propósito de se perceber se o processo produtivo está alinhado com os objetivos de longo prazo que o cliente estabeleceu para o mesmo. Outras informações importantes incluem a identificação de *bottlenecks* ou *capacity-constrained resources* e necessidade da colocação de *buffers* em pontos estratégicos do sistema, de forma a garantir a robustez do processo produtivo face a flutuações nos tempos ou nos rendimentos de cada operação.

1.4. Método seguido no projeto

O desenvolvimento da dissertação orientou-se pela seguinte estrutura. Em primeiro lugar, procedeu-se ao levantamento das características dos processos produtivos das empresas-clientes da CMF, em particular, a empresa de semicondutores mencionada, bem como o seu processo de planeamento atual e o ambiente em que se enquadra. Seguidamente, passou-se à discussão do enquadramento do projeto com os responsáveis da empresa, tomando em consideração quais seriam os objetivos esperados do algoritmo, o horizonte e a granularidade exigidos e quais as informações que seriam simultaneamente relevantes para a criação da ferramenta e que pudessem ser extraídas, ou futuramente incorporadas no MES, para alimentarem o módulo de planeamento.

A fase de implementação foi iniciada pela criação de uma base de dados relacional. Esta base de dados visa que todas as informações que se encontrassem dispersas no MES, bem como os

inputs e parâmetros do utilizador, pudessem ser reunidos de forma a construir o modelo. Estas informações incluem: a *bill of materials* (BOM), o conjunto de todas as operações a executar num dado produto (*Routing*), as ordens de produção (OP), e o resumo de todos os recursos cuja capacidade seria uma restrição para a produção. A agregação de todas estas informações é necessária de forma a retratar o processo produtivo e as relações entre linhas de produção a montante e a jusante. Por outro lado, outras informações relacionadas com o horizonte de planeamento a analisar, o dimensionamento de *buffers*, a permissão de atrasos em certas ordens de produção e o tempo máximo de espera de um lote na linha, que potencialmente seriam alvo de mudanças entre execuções da ferramenta de planeamento de uma forma mais frequente que as restantes e que seriam, por isso, introduzidas manualmente pelo utilizador, também deveriam ser reunidas para a construção do modelo. Estando reunidas todos os parâmetros e *inputs* necessários, seguiu-se a formulação do modelo matemático como um problema de Programação Inteira Mista (MIP), e a sua subsequente implementação recorrendo ao software *Gurobi Optimizer*.

Para a sua resolução, foram tentadas várias abordagens, envolvendo algoritmos de programação linear, com alterações sucessivas a serem justificadas por uma necessidade crescente de precisão ou de abrangência do modelo, ou da necessidade de um algoritmo mais eficiente para a resolução do problema. Tendo-se atingida uma solução satisfatória, passou-se a uma fase de validação, confrontando o modelo criado com uma instância real, bem como a verificação da flexibilidade e a robustez do modelo face a alterações significativa dos *inputs*. Esta questão é importante, dado que uma futura integração de um módulo de planeamento de capacidade semelhante ao desenvolvido, no *software* da empresa, implicaria que a ferramenta teria de ter flexibilidade para que outros clientes de diferentes indústrias, como sejam as indústrias automóvel, de dispositivos médicos e de painéis solares, pudessem, com algum esforço, adaptar a ferramenta criada à sua realidade.

Por fim, estando a fase de validação concluída, e tratando-se o presente projeto de uma prova de conceito, ou seja, de uma primeira etapa na criação de uma ferramenta de planeamento integrado no MES, passou-se a uma fase de reflexão do trabalho futuro, a ser realizado na empresa, para concretizar o propósito referido. Para esta reflexão, foi necessário ter em consideração que, para além da ferramenta de planeamento de capacidade desenvolvido, existe também um módulo de escalonamento, já integrado no *software* MES. Como tal, foi necessário ponderar como estas ferramentas poderiam ser integradas e alavancadas no futuro, para que o planeamento de produção seja um processo completo e integrado, incorporando todos os níveis de decisão necessários para os diferentes agentes decisores que participam no processo.

1.5. Estrutura da dissertação

O presente relatório encontra-se dividido em seis capítulos. O capítulo atual apresenta o contexto do problema abordado, a empresa e os objetivos a serem atingidos. O capítulo 2 contém a recolha bibliográfica realizada para avaliação do estado da arte e de quais as soluções tipicamente implementadas nesta área.

O capítulo 3, por sua vez, apresenta o caso de estudo utilizado, as características do *software* MES relevantes para o estudo atual, bem como outros pressupostos utilizados na construção da solução proposta.

O capítulo 4 detalha a solução proposta, ao nível dos modelos matemáticos e da estrutura hierárquica de planeamento. Os passos/momentos de implementação dos diferentes planos são também abordados, em particular qual a informação a ser passada entre diferentes níveis de planeamento.

O capítulo 5 prende-se com a análise dos resultados obtidos com a utilização da ferramenta no caso de estudo apresentado no capítulo 3.

Por fim, o capítulo 6 contém as conclusões retiradas da realização do projeto, melhorias expectáveis da introdução do processo de planeamento e rumos que podem ser seguidos num trabalho futuro.

2. Revisão da literatura

O presente capítulo apresenta a revisão da literatura que suportou o desenvolvimento da dissertação. Esta começa com a contextualização do planeamento de produção, apresentando-se a sua integração na estrutura hierárquica das empresas, bem como os diferentes níveis de ação em que este processo de enquadra. Seguidamente, procede-se à análise do estado da arte de um subdomínio do planeamento de produção, o planeamento da capacidade, analisando-se a evolução das formulações destes problemas.

São, também, abordados os processos de articulação entre diferentes níveis de planeamento, focando-se nas estruturas hierárquicas. Neste âmbito, são enfatizados os processos de passagem de informação entres níveis, bem como os problemas que advêm dessa comunicação. De seguida, é analisado o sistema de horizonte rolante, como um processo de implementação do planeamento de produção, e a possibilidade do seu alinhamento com o funcionamento hierárquico anteriormente apresentado.

Por fim, sendo a indústria de semicondutores *backend* o ponto de partida para a criação da ferramenta de planeamento de produção, é feita uma análise das características dos processos de produção e do respetivo planeamento.

2.1. Planeamento da Produção

Assim sendo, torna-se necessário analisar esta disparidade entre planeamentos a diferentes níveis, nomeadamente, estratégico, tático e operacional, no que diz respeito a objetivos, horizonte, granularidade e precisão e agente decisor. A referida disparidade é a motivação para a existência de diversos sistemas de planeamento. Encontra-se uma revisão abrangente e integral sobre os sistemas de planeamento de produção em (Almada Lobo 2005). A discriminação entre os diferentes níveis no que toca aos fatores já apresentados pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Diferenças entre as características de diferentes níveis de planeamento (Almada Lobo 2005)

Fator	Planeamento estratégico	Planeamento tático	Controlo Operacional
Objetivo	Gestão da mudança Aquisição de recursos	Utilização de recursos	Execução, avaliação e controlo
Instrumentos de implementação	Políticas, investimentos de capital	Orçamentos	Procedimentos, relatórios
Horizonte temporal	Longo	Médio	Curto
Âmbito	Alargado, nível corporativo	Intermédio, nível da fábrica	Estreito, nível do terreno
Nível de gestão envolvida	Topo	Intermédio	Baixo
Frequência de replaneamento	Reduzida	Média	Elevada
Fonte de informação	Maioritariamente externa	Externa e Interna	Maioritariamente interna
Nível de agregação	Largamente agregada	Moderadamente agregada	Largamente detalhada
Precisão requerida	Reduzida	Média	Elevada
Grau de incerteza	Elevado	Médio	Reduzido
Grau de risco	Elevado	Médio	Reduzido

Nestes três níveis, o planeamento de capacidade pretende encontrar os recursos necessários para a empresa satisfazer a procura (Chen et al. 2009). No longo prazo, este planeamento determina as instalações produtivas a abrir, a integração de novos fornecedores na cadeia de abastecimento e o lançamento de novos produtos (Chen et al. 2009). Num contexto mais tático, o planeamento da capacidade é responsável pela gestão de inventário, mão de obra, subcontratação e a aquisição de novos recursos. Por fim, o nível operacional pretende uma harmonização entre a disponibilidade dos recursos e as cargas neles colocadas num plano de produção semanal (Chen et al. 2009). Apresenta-se, na Tabela 2, uma classificação para os problemas de planeamento de capacidade.

Tabela 2 - Classificação dos problemas de Planeamento de Capacidade (Almada-Lobo 2005)

Problemas de Planeamento de Capacidade	
Uma unidade	Múltiplas unidades
Monoestágio	Multiestágio
Capacidade ilimitada	Capacidade limitada
Procura determinística	Procura estocástica
Procura estática	Procura dinâmica

A evolução histórica dos modelos de dimensionamento de lotes de produção é abordada em (Pochet 2001), iniciando-se no modelo *economic order quantity* (EOQ), o primeiro passo no desenvolvimento destes modelos. O EOQ procura um equilíbrio entre os custos de *setup* e os

custos de manutenção de inventário (Beck, Grosse, and Teßmann 2015), uma preocupação que se manteve presente no desenvolvimento de modelos posteriores.

Destes, destaca-se o algoritmo WW, proposto por Wagner e Within (Wagner and Whitin 1958), como uma evolução do modelo EOQ. Este algoritmo procura atingir um balanceamento semelhante ao EOQ, ou seja, uma minimização de custos de *setup* e de manutenção de *stock*, mas aplicado a um horizonte de planeamento limitado, com uma procura variável no tempo (procura determinística e dinâmica). O WW, da mesma forma que o EOQ, assume um problema de dimensionamento de lotes *single-stage*, com capacidade ilimitada.

No entanto, ao não considerar limitações de capacidade, o algoritmo WW torna-se limitativo, levando a que se tenham investigado alternativas capazes de representar esta realidade: destaca-se o modelo *capacitated lot-sizing problem* (CLSP) (Gicquel, Minoux, and Dallery 2008). O CLSP apresenta pressupostos semelhantes ao WW, ou seja, procura dinâmica e determinística ao longo de um horizonte finito (Pochet 2001), mas com a inclusão de restrições de capacidade no processo produtivo. Trata-se de um sistema *single-facility* e *single-stage*, ou seja, a produção ocorre em apenas uma unidade produtiva, considerando-se apenas uma etapa de produção para os produtos.

Este modelo, todavia, não toma em consideração a existência de componentes ou *sub-assemblies*, que devem ser incorporados no produto final a ser enviado para o mercado. Por outras palavras, a procura externa, imposta pelo mercado, para além de despoletar a produção do produto final, cria, indiretamente, também uma procura interna, levando a que os diversos componentes de incorporação necessários sejam produzidos em quantidade e antecipação suficientes para que o produto final seja executado. A relação entre os diferentes produtos/componentes é expressa na *bill-of-materials* (BOM), estipulando em que operação é que cada componente deve ser incorporado no produto e em que quantidade.

De forma a ter em consideração estas dependências internas entre diferentes produtos, apresenta-se de seguida o *capacitated multi-stage lot-sizing problem* (CMSLSP), conforme formulado em (Almada Lobo 2005):

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (s_{it} \cdot Y_{it} + h_{it} \cdot I_{it}) \quad (2.1)$$

Sujeito a

$$I_{it} = I_{i(t-1)} + X_{it} - \text{proc}_{it} - \sum_{j \in \text{Suc}(i)} a_{ij} X_{jt}, \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N \quad (2.2)$$

$$X_{it} \leq B_{it} \cdot Y_{it}, \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N \quad (2.3)$$

$$\sum_{i=1}^N (p_{ik} \cdot X_{it}) \leq \text{Cap}_{kt}, \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, K \quad (2.4)$$

$$X_{it}, I_{it} \geq 0; Y_{it} \in \{0,1\} \quad (2.5)$$

onde

t Período

i, j Componentes

k Recursos com restrições de capacidade utilizados para produzir todos os

	componentes
$proc_{it}$	Procura do componente i no (final do) período t
p_{ik}	Consumo do recurso k necessário para produzir uma unidade do componente i
h_{it}	Custo de manter em <i>stock</i> uma unidade do componente i no período t
s_{it}	Custo de <i>setup</i> incorrido se o componente i for produzido no período t
Cap_{kt}	Capacidade disponível do recurso k no período t
$Suc(i)$	Conjunto de sucessores imediatos do componente i
a_{ij}	Número de unidades do componente i necessárias para produzir uma unidade do componente $j \in Suc(i)$
X_{it}	Quantidade produzida do componente i no período t
I_{it}	<i>Stock</i> do componente i no final do período t
Y_{it}	$\begin{cases} 1, & \text{se o componente } i \text{ é produzido no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
B_{it}	Quantidade máxima que é possível produzir do componente i no período t

A expressão (2.1) corresponde à função objetivo, traduzindo o intuito de minimizar os custos de *setup* e os custos de manutenção de *stock*. A expressão (2.2) denota o balanço de material entre períodos sucessivos. Nesta, tomam-se como *inflows* a quantidade produzida do componente i e a quantidade desse componente em inventário no final do período anterior; os *outflows* correspondem à quantidade que é deixada em inventário no final do período t e os consumos desse produto para satisfazer a procura. Deve notar-se que esta procura se subdivide em duas, como anteriormente referido: o termo $proc_{it}$ refere-se à procura externa, imposta pelo mercado, enquanto que o termo $\sum_{j \in Suc(i)} a_{ij} X_{jt}$ refere-se à procura interna, dependente da produção de componentes que consomem i .

A expressão (2.3) corresponde à consideração de *setups* sempre que seja tomada a decisão de se fabricar o componente a eles associado num dado período, levando à contabilização do custo correspondente na função objetivo. A expressão (2.4) corresponde às restrições de capacidade no período t para o recurso (ou grupo de recursos) k , implicando que a soma da carga colocada sobre o recurso não exceda a sua disponibilidade. A expressão (2.5) define o domínio das variáveis de decisão.

O CMSLSP foi demonstrado pertencer à classe NP-hard (Florian, Lenstra, and Rinnooy Kan 1980) e, caso se escolha a consideração de tempos de *setup* nas restrições de capacidade, o problema de decisão associado com a obtenção de uma solução admissível é NP-completo (França et al. 1997). Como tal, é necessário ter em consideração que a probabilidade de o problema poder ser resolvido por métodos exatos é baixa, para problemas de elevada complexidade. Desta forma, têm sido desenvolvidos vários métodos de solução heurísticos, baseados em algoritmos genéticos (Xie and Dong 2002), *simulated annealing* (Barbarosoglu and Özdamar 2000) e algoritmos meméticos (Berretta and Rodrigues 2004).

2.2. Hierarchical Production Planning (HPP)

A questão do planeamento hierárquico (*Hierarchical Production Planning – HPP*) é também abordada em (Schneeweiß 1995), como uma abordagem e um enquadramento para a conciliação das características dos diferentes níveis de planeamento. Consiste na divisão do

problema global de planeamento da produção em subproblemas com diferentes horizontes temporais, tratando cada um destes como um modelo matemático, efetivamente atribuindo a tomada de decisão de cada nível hierárquico a um modelo correspondente. Limitando a abrangência de cada um dos modelos e resolvendo-os de forma separada, a complexidade total é reduzida.

Por sua vez, o número de subproblemas a serem criados, e os seus níveis de agregação, terá de levar em consideração vários fatores, como sejam os apresentados em (Almada Lobo 2005):

- *Lead times* (prazos de entrega) e os horizontes temporais. Uma grande variabilidade entre os tempos de tomada de diferentes decisões, e dos seus níveis de abrangência temporal, aponta para a criação de diferentes níveis hierárquicos.
- Similaridade. Semelhanças entre produtos e recursos poderão motivar agregações/simplificações, como sejam conjuntos de recursos ou grupos/famílias de produtos a um mais longo prazo, sendo as diferenças entre grupos escrutinadas num nível de planeamento mais detalhado.
- Decisão. O HPP deve espelhar o processo e a hierarquia de tomada de decisão existente na empresa.

Os HPP's, no entanto, apresentam também diversas desvantagens, que se tornam em obstáculos no momento de implementação, relacionadas com o seu procedimento para a obtenção de uma solução: a resolução sucessiva de cada um dos subproblemas. Tal leva a que, caso o processo de passagem de informação entre os modelos, com a consequente agregação/desagregação de informação, não tenha em consideração as relações e as características dos diferentes níveis, ocorram inadmissibilidades ou soluções subótimas do problema (Vicens et al. 2001).

Como tal, uma área de grande interesse é o estudo dos mecanismos de interligação dos diferentes níveis que permitam precaver contra a obtenção de soluções insatisfatórias, ou a impossibilidade de obter um plano exequível. Em (Schneeweiß 1995) encontra-se uma *framework* para a comunicação entre os diferentes níveis, estabelecendo-a como um procedimento com 3 passos, como visível na Figura 1: antecipação, instrução e reação.

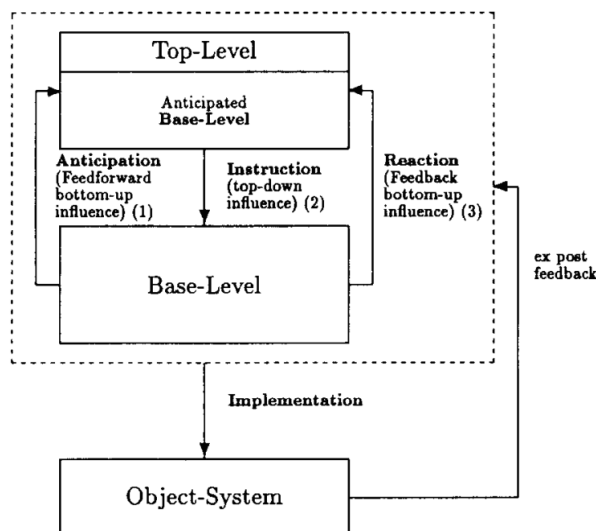


Figura 1 - Relações entre diferentes níveis de planeamento (Schneeweiß 1995)

- Antecipação: O modelo de nível mais alto é ajustado de acordo com o que se prevê que sejam as características do modelo de mais baixo nível. Isto passa pela incorporação

de aspetos e condicionantes do *base level*, mas a um nível de agregação consistente com o *top level*. Trata-se, portanto, de uma influência *bottom-up* no subproblema de mais alto nível.

- Instrução: tendo-se atingido uma solução para o nível de decisão mais elevado, esta decisão é utilizada para influenciar o *base level*, tratando-se, por isso, de uma influência *bottom-up*.
- Reação: ao ser resolvido, o sistema de baixo nível é também capaz de enviar uma resposta ao modelo de alto nível, ocorrendo uma nova influência *bottom-up*, enviado em *feedback* às instruções emitidas anteriormente por este último.

É preciso ter em atenção que este processo de negociação, como apresentado em (Schneeweiß 1995), pode envolver vários ciclos de instrução/reacção com várias fases de antecipação, denotando um processo iterativo até ao atingir de uma solução que satisfaça ambos os níveis.

Outra questão importante é “que informação incluir nas comunicações entre os diferentes modelos?”. Como já foi referido, uma das maiores limitações das estruturas HPP é a dificuldade de manter a admissibilidade/otimalidade das soluções encontradas no momento de desagregação da informação.

(Vicens et al. 2001) apresenta uma *framework* para a construção de sistemas HPP, a sua integração com outros sistemas de informação existentes na empresa e com diferentes decisores dentro da empresa. É abordada, com detalhe, uma estratégia para a agregação/desagregação ao nível de produtos/grupos ou famílias de produtos, envolvendo uma ponderação dos diferentes tempos de processamento entre diferentes elementos do mesmo grupo. Este valor é utilizado em antecipação da resolução do modelo de alto nível, sendo posteriormente recalculado após a resolução do modelo de mais baixo nível.

2.3. Planeamento em horizonte rolante

Uma prática comum no processo de planeamento da produção é a utilização de um planeamento em horizonte rolante (Sethi and Sorger 1991). Neste tipo de sistema, o utilizador pretende apenas tomar as decisões que concernem aos períodos mais imediatos. Assim sendo, procura ter-se em consideração um horizonte temporal tal, que seja viável que esta decisão seja o mais precisa possível (Sethi and Sorger 1991). Estando as decisões para os períodos mais imediatos tomadas, ocorre o rolamento do horizonte: os períodos seguintes tornam-se os mais imediatos, passando o horizonte temporal a incluir novos períodos não considerados na iteração anterior. Esta abordagem possibilita também uma revisão frequente dos objetivos estabelecidos para um dado período antes da implementação do mesmo (Sethi and Sorger 1991).

(Vogel, Almada-Lobo, and Almeder 2017) apresentam duas metodologias paralelas para a realização de um planeamento, envolvendo um nível de planeamento de capacidade (*Aggregated Production Planning – APP*), e um nível de escalonamento (*Master Production Scheduling – MPS*), estudando-se vantagens e desvantagens entre um funcionamento hierárquico e um funcionamento integrado para estas duas vertentes do planeamento da produção. Especial atenção é dada à passagem de informação entre níveis, como estes *inputs* devem ser lidados pelos diferentes modelos, e como realizar o planeamento numa perspetiva de planeamento em horizonte rolante, a nível das trocas de informação expressas no modelo de (Schneeweiß 1995).

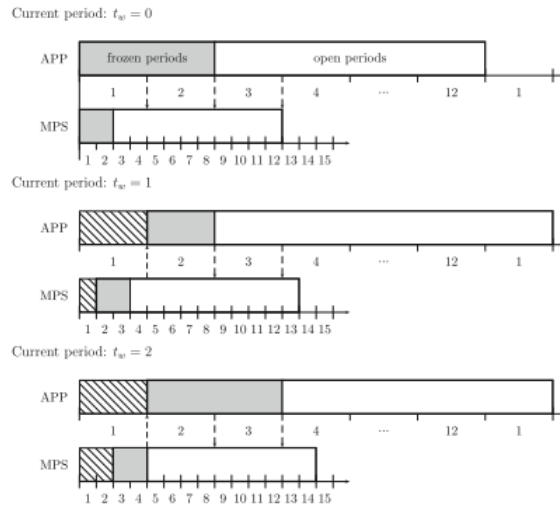


Figura 2 – Implementação do planeamento hierárquico em horizonte rolante (Vogel, Almada-Lobo, and Almeder 2017)

Atente-se na implementação do horizonte rolante expressa na Figura 2. O planeamento de produção agregado é realizado num horizonte de 12 meses, sendo o escalonamento de operações executado com um horizonte de 12 semanas. Em ambos os horizontes, os dois primeiros períodos são considerados fixos, ocorrendo uma fixação da capacidade disponível ao nível do APP, através da fixação do número de linhas produtivas a abrir/fechar, e a criação de limites superiores e inferiores para a capacidade disponível no MPS. Desta forma, mitiga-se a magnitude das variações nos planos obtidos para os mesmos períodos em iterações sucessivas, estabilizando-se os períodos do plano mais próximos de serem implementados. Observa-se que, em (Vogel, Almada-Lobo, and Almeder 2017), em ambos os níveis, os seus dois primeiros períodos estão fixos e o remanescente dos horizontes está aberto a toda a dinâmica.

Na primeira iteração, a informação referente ao primeiro horizonte do *MPS* é retirada e desagregada dos períodos homólogos no *APP*. Esta instrução irá definir quantas linhas de produção irão estar disponíveis e também quais as metas a nível de inventário a atingir no final de cada semana, para cada *product family* pertencente a um dado *product group*. Após isto, ocorre o avanço do horizonte rolante, passando-se a considerar o primeiro período de cada um dos níveis como implementado, sendo este excluído do horizonte de planeamento. Note-se a existência de uma influência *bottom-up* a partir da segunda iteração ($t_w = 1$): esta reação corresponde à atualização dos tempos de processamento do *APP* para ter em consideração *setups* verificados no *MPS*, bem como a substituição do inventário inicial do novo horizonte do *APP*, anteriormente pelos valores obtidos no *MPS* no final do período homólogo ($t_w = 4$). Para os restantes meses, o *APP* continua a exercer a sua influência *top-down*, definindo as metas de inventários a serem atingidas no *MPS*.

Em (Clark 2003) é abordado um método para se obter um *master production schedule* (MPS) admissível, a partir da decomposição de um sistema de *capacitated material requirements planning* (CMRP), envolvendo *setups* dependentes da sequência. Duas estratégias são abordadas: a primeira, consiste em eliminar as variáveis binárias que refletem os *setups* de todo o planeamento simplificado (ou seja, todos os períodos excluindo $t=1$, onde se executa um planeamento detalhado), e proceder a uma penalização dos tempos de *setup* nos tempos de processamento das diversas operações; a segunda envolve o alargamento desta estratégia ao período correspondente ao planeamento mais detalhado, relaxando também as variáveis correspondentes a *setups* no período $t=1$. Em todo o caso, a estimação dos parâmetros de agravamento de tempo de processamento é feita recorrendo a um modelo MIP.

Outra abordagem consiste em corrigir as restrições de capacidade para se ter em conta o desprezo dos *setups*. Em (Stadtler 2003), os *downtimes*, ocorrentes no período de planeamento detalhado/escalonamento, são tomados como representativos do que ocorrerá no horizonte de planeamento agregado, sendo, por isso, usados como penalização na disponibilidade dos recursos nos períodos seguintes. Como tal, esta é afetada por um parâmetro que é estimado a partir da distribuição de tempos de *setup* (média e desvio padrão).

Por fim, uma outra alternativa consiste em transformar *setups* dependentes da sequência em *setups* independentes da mesma, no horizonte de planeamento agregado, permitindo que os custos de *setup* não sejam ignorados, algo que poderia potencialmente levar a um elevado número de *changeovers* numa dada máquina, ou ao dimensionamento de lotes de produção de dimensão reduzida (Guimarães 2015).

Em (Guimarães 2015), explora-se como fazer este controlo em diversos sistemas de planeamento em horizonte rolante. Estas estratégias incluem o aumento dos tempos de processamento das operações, a redução da capacidade disponível em cada período, o ignorar de *setups* dependentes da sequência. É também apresentado um método iterativo, visível na Figura 3, como forma de aperfeiçoar a obtenção dos parâmetros empregues nos ajustes referidos, utilizando-se um critério de paragem que reflete uma estabilização/estagnação do plano entre iterações sucessivas. Sendo a precisão na obtenção destes parâmetros apontada como um dos principais potenciadores de uma solução de boa qualidade, pode concluir-se que o processo iterativo constitui uma melhoria face a sistemas baseados numa estimação pontual.

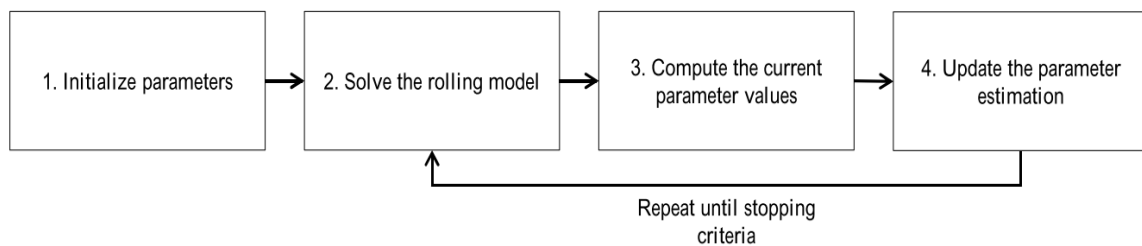


Figura 3 – Processo iterativo para a determinação de parâmetros de correção do modelo de alto nível (Guimarães 2015)

2.4. Desafios de planeamento na indústria de semicondutores *backend*

O conhecimento do processo produtivo e das características da indústria é essencial para determinar quais as exigências colocadas sobre o processo de planeamento. Por esta razão, foi feito um levantamento de quais os problemas típicos enfrentados no planeamento na indústria de semicondutores *backend*, já que esta última foi a que motivou a realização do presente projeto.

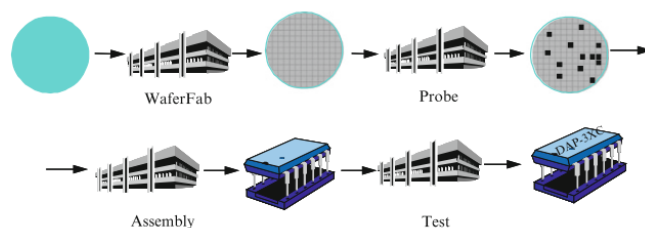


Figura 4 - Os quatro principais processos de fabrico de semicondutores (Mönch, Fowler, and Mason 2013)

(Sivakumar and Chong 2001), apresentam, nos seus pressupostos, as características do processo produtivo. Na Figura 4, são apresentadas as quatro fases na produção de semicondutores: *WaferFab* – o fabrico das *wafers*, *Probe* – teste das mesmas, *Assembly* – embalagem e montagem dos circuitos integrados (*Integrated Circuits* – IC), e a fase de *burn-in* dos IC. Estas quatro fases estão tipicamente divididas em dois grandes processos: o chamado *frontend*, correspondente aos dois primeiros processos, e o *backend*, composto pelos últimos dois.

A indústria de semicondutores é caracterizada pelo fabrico de circuitos integrados em placas de silício, designadas por *wafers* (Mönch, Fowler, and Mason 2013). Nestas, vários milhares de pequenos *chips* semelhantes são criados, através da impressão dos circuitos eletrónicos. Após o seu fabrico, estas *wafers* são enviadas para uma operação de *probe*, em que cada um dos futuros *chips*, comumente designados por *dies*, são sujeitos a testes elétricos, com o intuito de identificar quais destes são defeituosos. Ao invés de se descartar uma *wafer* com milhares de *dies*, apenas por uma pequena porção conter defeito, é criado um mapa eletrónico contendo as posições dos mesmos. Este processo marca o fim do *frontend*, com as *wafers* a serem, de seguida, enviadas, para instalações de *backend*.

Focando no processo de *backend*, apresenta-se, na Figura 5, o típico *flow shop* encontrado nestas indústrias, sendo este, por sua vez, divisível em três processos produtivos: pré-montagem, montagem e teste. O processo inicia-se com o corte das *wafers*, a fixação dos *dies* a uma *leadframe* e posterior cura. Seguidamente, executa-se a operação de *Wire Bonding*, em que as *dies* são ligadas à *leadframe*. Posteriormente, seguem-se as operações de moldagem, *deflashing* (remoção de rebarbas resultantes da aplicação da resina utilizada no transporte das *wafers*), marcação a laser e *plating*. Por fim, ocorrem os processos de *trimming & forming*, em que cada componente moldado da *leadframe* é separado. Os componentes, já como entidades singulares, são testados e classificados podendo, após a primeira ronda de testes, serem transferidos para a fase de *burn-in*. Para terminar, são efetuados alguns testes complementares, seguindo-se o embalamento e expedição dos componentes.

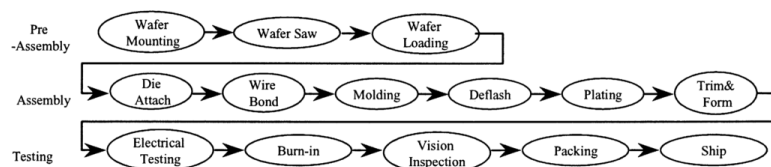


Figura 5 – Principais passos do *backend* do processo de fabrico de semicondutores (Mönch, Fowler, and Mason 2013)

Em (Sivakumar and Chong 2001), é referido também que uma típica fábrica de *backend* pode lidar com uma grande variedade de produtos, sendo de esperar ordens de produção para uma gama de 1000-2000 produtos diferentes. Em paralelo, um grande número de produtos exige um percurso único, o que, do ponto de vista do planeamento, resulta num grande número de fluxos e de tempos de processamento a ter em consideração.

Em termos de horizontes de planeamento, (Mönch, Fowler, and Mason 2013) apresenta os intervalos de tempo para cada hierarquia de decisões: planeamento (num sentido mais agregado) é algo que pode ser feito com uma abrangência de meses ou anos. A colocação de novas ordens de produção ocorre semanalmente ou bissemanalmente. O escalonamento, ou programação de operações, ocorre tipicamente numa base diária e o despacho para linha, ocorre de forma contínua.

3. Caso de estudo e outros pressupostos

Neste capítulo analisa-se o problema presente em duas dimensões. A primeira é voltada para a componente externa do problema, ou seja, o cliente: explora-se o caso de estudo, base do atual projeto, passando pela análise da empresa-cliente, das particularidades dos processos produtivos nelas presentes, as dificuldades por ela experienciadas e o estado do processo de planeamento atualmente empregue.

A segunda dimensão da análise prende-se com a componente interna do problema, ou seja, a componente relacionada com a CMF, focando-se na interligação da ferramenta com a estrutura de dados do MES, bem como outros sistemas de planeamento da produção nele já existentes.

3.1. Caso de estudo - A empresa cliente



Figura 6 - Dispersão das diferentes unidades da empresa cliente

A empresa que servirá como caso de estudo, para a construção do planeamento da produção, será uma empresa de semicondutores, mais em particular a sua unidade produtiva localizada em São Paulo, no Brasil, especializada na vertente de embalagem, montagem e teste dos *IC's*; no fundo, a componente *backend* do processo.

A empresa conta com um *product mix* com mais de 500 produtos, quer *standard* quer customizáveis, visando os mercados automóveis, de defesa, comunicações, computação e industrial. Destes, destacam-se os componentes *dynamic random access memory* (DRAM) e unidades de armazenamento *flash*, em que a unidade brasileira é líder na sua produção. As últimas têm como destino o mercado de *smartphones* e *tablets*, a computação, e o mercado de retalho, na forma de *MP3's*, *USB drives*, entre outras.

Outras famílias de produtos, com as quais a unidade em questão lida são os *embedded multimedia card* (eMMC), cartões de memória utilizados para armazenamento em estado sólido (*solid-state storage*), e também os *multi-chip packages* (eMCP), uma configuração em que vários *chips* se encontram ligados, através da operação de *wire bonding*, a uma *circuit*

board. Ambas estas configurações são direccionadas ao mercado *mobile*, ou seja, ao mercado de *smartphones e tablets*, com os *eMMC's* a serem também empregues noutras aplicações, como sejam câmaras fotográficas, rádios, dispositivos de *GPS*.

Recentemente, a empresa iniciou, também, a produção de *solid state drives* (SSD), utilizados em aplicações de acesso de alta velocidade, em servidores e outros dispositivos de armazenamento, como a principal forma de armazenamento em aparelhos móveis, nomeadamente *tablets* e como substitutos do tradicional *hard disk drive* (HDD) em portáteis.

Nesta localização, a empresa desfruta de uma vantagem estratégica, ao nível de uma cadeia de abastecimento de elevada eficiência, com *leadtimes* de curta duração, grande flexibilidade e integração vertical, com os componentes e consumíveis utilizados na produção, a provir de outras unidades do grupo, dispersas internacionalmente, como se pode constatar na Figura 6. Acresce, ainda, que se trata da única firma oriunda do Brasil com capacidades de montagem (*packaging*) de IC's, o que, por sua vez, se traduz num ambiente competitivo favorável, com os outros *players* do mercado a assumirem uma presença limitada e a enfrentarem problemas ao nível da cadeia de abastecimento, nomeadamente, na importação de componentes. Outro fator de competitividade da empresa em questão é o facto do mercado de computadores pessoais, um dos principais consumidores dos IC's desenvolvidos na empresa, estar em rápido crescimento no Brasil.

3.2. Caso de estudo - Processo produtivo

Tratando-se de uma empresa de montagem de semicondutores (*backend*), o processo produtivo da empresa assemelha-se ao processo genérico para esta indústria, apresentado no Capítulo 2. Assim sendo, este pode ser separado em duas grandes áreas: a montagem e o *burn-in*.

Focando na primeira, como se observa na Figura 7, existem quatro grandes áreas, associadas a quatro grandes tipos de materiais: as *wafers*, contendo os *chips*; os substratos, a base onde os *chips* são montados; o *mold compound*, uma substância protetora dos IC's e a zona de montagem.

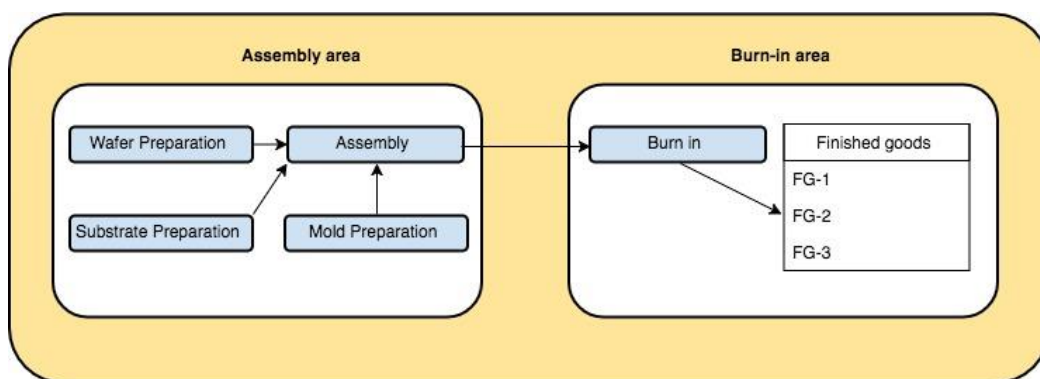


Figura 7 - Diferentes linhas/departamentos de produção

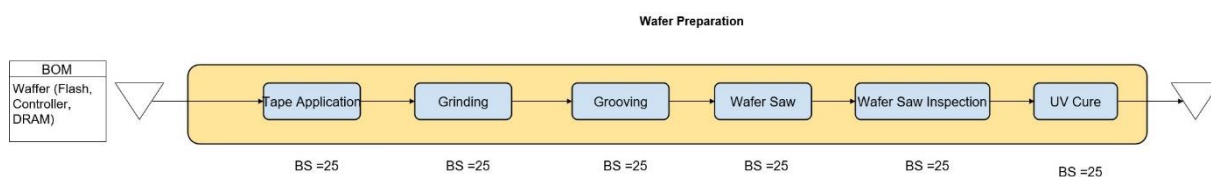


Figura 8 - Linha de preparação das wafers

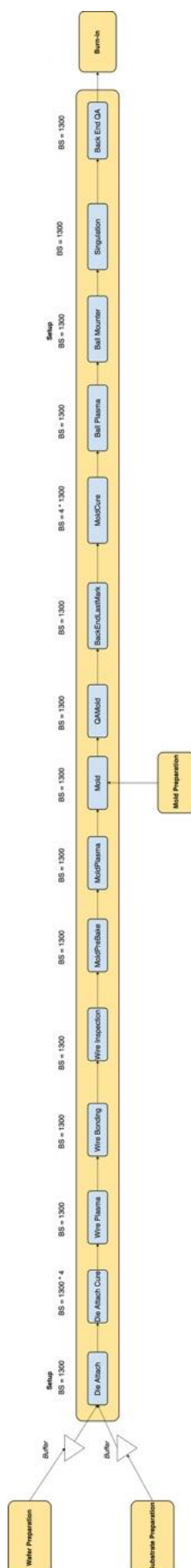


Figura 10 - Linha de montagem dos dies. Note-se a relação com as restantes linhas de produção

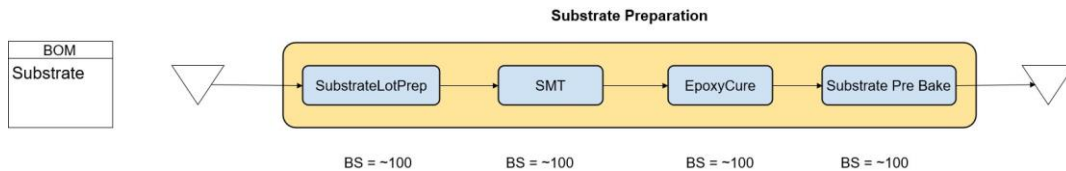


Figura 11 - Linha de preparação do substrato

Uma questão a ter em atenção é a variação do tamanho do lote de processamento ao longo da linha, como função dos equipamentos utilizados e dos mecanismos de transporte entre máquinas. Assim sendo, na linha de preparação de *wafers*, visível na Figura 9, os recursos, tipicamente, trabalham com lotes de processamento de 25 *wafers* cada. Entrando na linha de *Assembly*, apresentada na Figura 10, em que cada *die* da *wafer* é separado e colocado na placa respetiva, o lote de processamento passa a integrar 1300 unidades. No entanto, destaca-se que, por razões de economia de energia, em operações de cura, usualmente, procede-se à agregação de 4 lotes de 1300 *dies*, podendo, assim, afirmar-se que o tamanho do lote de processamento é de 5200 unidades. A preparação do substrato ocorre em lotes cuja dimensão é afetada pelo rendimento obtido nas operações precedentes do seu ponto de incorporação, no que seria considerada a linha principal, ou seja, a linha de *assembly*; no entanto, tendem a assumir um tamanho de cerca de 100 unidades.

É preciso também ter em atenção que o tempo de processamento das operações pode ser dividido em duas parcelas: o *setup*, sofrido sempre que um novo lote é processado, ligado a questões de carregamento e descarregamento do mesmo no equipamento e alguma preparação que seja necessária em antecipação da execução da mesma, e uma componente variável, função da quantidade existente no lote.

É necessário aqui fazer uma distinção entre dois tipos de operações: aquelas em que o processamento de cada unidade é feito de forma sequencial e aquelas em que o processamento envolve todo um *batch* em simultâneo.

A título de exemplo do primeiro caso, tome-se a operação de *Die Attach* e decompõe-se a mesma nas suas suboperações:

1. Colocação da *magazine (batch)* de *wafers* no ponto de alimentação da máquina;
2. Montagem das *dies* nos substratos correspondentes;
3. Remoção da *magazine* gasta (parcial ou totalmente) e do novo *batch* de produtos finais.

Em consequência, é necessário considerar que os tempos de processamento necessários, para a realização dos passos 1 e 3, serão sempre semelhantes, não havendo uma dependência entre estes e a quantidade a ser processada. Noutras palavras, o tempo de processamento do passo 1 será semelhante, quer o material empregue seja uma *wafer* de *DRAM'S* ou uma *wafer* de controladores. Por outro lado, tendo em conta que este é um passo ao nível do lote, o seu tempo de processamento será semelhante, quer a *magazine* contenha 25 *wafers* ou um número inferior. O passo 2, no entanto, caracteriza-se pelo “pegar” de cada *die* necessária, individualmente, por um braço mecânico e a sua colocação no substrato correspondente. Sendo esta uma operação que ocorre de forma sequencial, é expectável que o tempo necessário para executar esta operação esteja em dependência da quantidade de *dies* a serem montadas, ou seja, o tempo de processamento será proporcional à quantidade transportada em cada *batch*. Em conclusão, atendendo à classificação anteriormente referida, a componente fixa do tempo de processamento corresponderia aos passos 1 e 3, e a componente variável ao passo 2.

Não obstante, em operações como curas, *burn-in's* e alguns outros tipos de testes, o passo de processamento do *batch* é diferente. Nestes, ocorre uma execução da operação em simultâneo

em todas as entidades do *batch*, sendo o tempo de processamento algo que é estipulado pelo processo em si e não tem dependência da quantidade que vai ser processada. Neste tipo de processos, a componente fixa do tempo de processamento assume a totalidade do tempo requerido para a sua execução.

Outro ponto a ter em consideração é a proteção de processos-chave com a colocação de pontos de armazenamento na linha, designados por *buffers*, criados para servir como um elemento estabilizador, face a variabilidades existentes no processo, como sejam variações nos tempos de processamento, avarias e *downtimes*, entre outros.

Tratando-se este de um ambiente *make-to-order*, com uma procura volátil e difícil de prever, um leque de produtos bastante alargado e com componentes (*wafers*) de elevado custo, depreende-se que se torna difícil manter os *buffers* de proteção de elevada dimensão. Como tal, a estratégia de proteção de etapas condicionantes do processo, como sejam *bottlenecks* e *capacity constrained resources*, passa pela manutenção de algum inventário a montante, mas também por um sobredimensionamento da capacidade. Isto acontece de duas formas: por um lado, a alocação de equipamentos que são polivalentes, ou seja, que estão preparados para executar a sua operação para uma gama alargada de produtos, a apenas um produto ou famílias; por outro, a manutenção de alguns equipamentos-extra em *standby*. O elevado grau de automatização do sistema permite, para um grande número de passos, que estes recursos-extra sejam rapidamente preparados para substituir outros, em caso de avaria.

Em termos de *buffers*, a empresa-cliente tem o seu *buffer* de dimensão mais considerável antes da operação de *Die Attach*. O seu propósito, para além da proteção da operação seguinte, é o armazenamento de *wafers* que não tenham sido consumidas inteiramente num lançamento de um *batch* no *Die Attach*, podendo ser utilizadas para lotes futuros. Existem, noutros locais da linha, pontos de armazenamento de pequena dimensão, com o propósito de fazer agregação/separação de lotes, com o objetivo de, por exemplo, separar peças para retificação.

No que toca a *setups*, existem dois tipos de preocupações que devem ser tomadas em consideração. A primeira prende-se com o tempo despendido com o processo de mudança do equipamento/processo, preparando-se assim para produzir um produto diferente, tempo esse que é subtraído à disponibilidade total do sistema. Como tal, é desejável que estas operações de *setup* sejam mantidas a um mínimo. A este nível, deve notar-se que, tendo em conta que a maior parte do processo é realizado com equipamento computadorizado, muitos dos *changovers* implicam simplesmente uma operação ao nível do *software*, não representando perdas significativas ao nível de tempo produtivo. Salienta-se, no entanto, a existência de certas operações que implicam uma intervenção física no equipamento, com um *downtime* resultante de trocas de ferramentas, como sejam a *Wafer Saw*, a *Die Attach* ou a *Ball Mounter*.

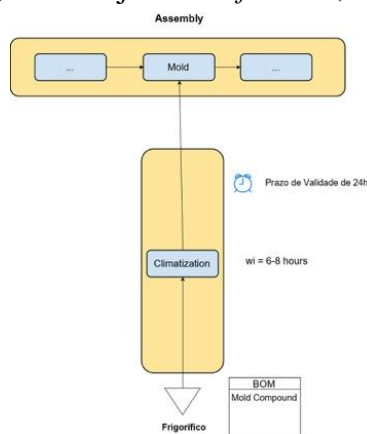


Figura 12 - Processo de preparação do composto de molde para integração no produto.

Existe, no entanto, outra preocupação ligada não especificamente a perdas de tempo produtivo, mas também a gastos de energia consideráveis associados à ativação de certos recursos, como sejam operações de cura em fornos industriais. Aqui, a preocupação já não passa por uma minimização do número de ativações do recurso, mas sim o aproveitamento de economias de escala, garantindo que as ativações são eficientes, tentando-se trabalhar sempre com a capacidade máxima para cada um dos equipamentos.

Outro fator condicionante no processo são as restrições temporais na execução de certas operações por perecibilidade dos componentes produzidos. Tome-se como exemplo o processo de climatização do composto de moldagem (*mold compound*), visível na Figura 12: após estes serem retirados da refrigeração, segue-se um período de 6 a 8 horas, em que os compostos são deixados ao ar livre, de forma a atingirem a temperatura ambiente. Terminando esta climatização, existe um período no qual este componente deverá ser consumido, de cerca de 24 horas, caso contrário, torna-se inviável e tem de ser descartado. A questão dos rendimentos também é algo que deve ser tratado com especial cuidado. No caso da indústria de semicondutores *backend*, a deteção de um componente não-conforme não leva à sua remoção imediata do fluxo de material, e o seu encaminhamento para sucata ou retificação. *Chips* defeituosos, já identificados no processo de *probe* ainda no *frontend*, permanecem integrados nas suas *wafers*, com as suas posições marcadas num esquema eletrónico. Os substratos, por sua vez, experienciam uma situação semelhante: algumas das posições de montagem de *chips* podem estar defeituosas, no entanto, o substrato, como um todo, não é descartado; simplesmente marcam-se as posições defeituosas num mapa eletrónico, de forma análoga ao que ocorre com as *wafers*.

Na operação de montagem destes dois componentes, o *Die Attach*, esta situação é lidada através de uma correspondência entre as posições entre os dois mapas: a máquina está configurada para montar *chips* conformes em posições não defeituosas, e *chips* defeituosos em posições com falha. Assim sendo, obtêm-se peças conformes e não conformes que seguem o mesmo fluxo de operações, podendo estas apenas serem segregadas quando se atinge a operação de *Singulation*, em que os diferentes conjuntos posição de substrato – *chip* são, por fim, fisicamente separados. Como tal, ao nível do planeamento da produção, é preciso ter em consideração que, apesar de rendimentos esperados nas diversas operações, o *outflow* de material defeituoso apenas pode ocorrer numa operação mais a jusante na sequência produtiva, implicando que, até esse ponto, as peças defeituosas tenham tanto impacto a nível de processamento e armazenamento como as peças conformes.

O *burn-in*, por sua vez, apresenta também uma questão ao nível do rendimento da operação, através de um processo designado por *binning*. Até à ocorrência deste conjunto de operações, as especificações dos componentes produzidos, a nível de velocidade ou potência, são desconhecidas, sendo determinadas, neste passo, por via de teste. O *binning* é distinto de outras situações de teste, porque o seu resultado pode não se resumir a peças conformes e peças rejeitadas: o que se obtém, na prática, são diferentes gamas do mesmo produto, que podem ser comercializadas a diferentes mercados/clientes. A estimação das diferentes percentagens é feita a partir de valores históricos, sendo o planeamento de produção feito em função do rendimento na obtenção do produto principal; o destino a dar a subprodutos obtidos é, atualmente, algo decidido *a posteriori*.

3.3. Caso de estudo - Dificuldades

As principais dificuldades reportadas pelo cliente, no seu processo de planeamento, prendem-se, a um nível operacional, com a capacidade de:

- Prever, com precisão, em que momento, as ordens de compra dos componentes/matérias-primas devem ser lançadas em produção;
- Prever, em que momento, os componentes de incorporação, de origem interna à empresa, devem ter as suas ordens de produção lançadas e o seu processo de produção iniciado;

Por sua vez, outros fatores de interesse, a nível mais tático, consubstanciam-se em:

- Validar, a nível de capacidade de produção, as diversas encomendas, solicitadas pelo cliente, como mecanismo de apoio à decisão à aceitação das mesmas;
- Obter uma estimativa de qual o *leadtime* necessário para o cumprimento das diferentes ordens de produção;
- Visualizar o número de recursos de produção necessários para cumprir as diversas ordens de produção;
- Visualizar a necessidade de tomar possíveis medidas de contingência, como sejam a renegociação de datas de entrega e de atrasos nas entregas aos clientes.

Por sua vez, a CMF pretendia, mais do que uma ferramenta que fosse construída especificamente para as circunstâncias experienciadas pelo cliente, já conhecidas com bastante detalhe *a priori*, a prova de que seria possível construir uma ferramenta com flexibilidade suficiente para poder ser utilizada pelos departamentos de planeamento de diversos clientes de diferentes indústrias. Sendo assim, diversos fatores têm que ser assumidos como sendo variáveis no momento da criação da ferramenta, incluindo:

1. *Lead times*;
2. Recursos críticos (*CCR's* e *bottlenecks*);
3. Número de operações por fluxo;
4. Tempos de processamento;
5. Duração exata dos horizontes de planeamento, nos níveis tático e operacional;
6. *Setups*;
7. Políticas de produção (*JIT*, *drum-buffer-rope*, ...);
8. Número de ordens de produção a considerar.

A ausência de um conhecimento profundo sobre o processo produtivo de futuros utilizadores da ferramenta criada priva o seu fornecedor de um dos fatores mais importantes para o sucesso da implementação de um sistema de planeamento. Torna-se, assim, imperativo, mais do que tomar o caso do cliente como perfeitamente representativo da realidade vivida noutras empresas, encontrar bases comuns entre os potenciais utilizadores da ferramenta. Como já referido, os principais clientes da CMF estão na indústria de peças automóveis, de semicondutores, de equipamentos médicos, e da produção de painéis solares. Partindo destas premissas, podem apontar-se algumas características que serão tomadas como comuns entre diferentes clientes:

1. Produção em quantidades discretas, ou em *batch*. Excluem-se daqui casos de produção contínua ou semicontínua, como sejam as indústrias químicas, petroquímicas e de geração de energia elétrica;
2. Produção em sistemas *make-to-order* ou um misto de *make-to-order/make-to-stock*. A procura nestas indústrias tende a ter uma forte componente dinâmica, com o mercado a ser o principal motor para a colocação de prazos de entrega.
3. Um *product mix* consideravelmente alargado, com um grande grau de customização.
4. Um elevado valor dos componentes e dos produtos finais. Os custos de oportunidade de manter ambos em inventário são consideráveis, quer pelo seu valor, quer pela rapidez com que novos produtos são desenvolvidos, podendo levar à obsolescência de produtos atuais.
5. Um ritmo rápido de inovação e de investigação e desenvolvimento (I&D), levando a que produtos novos sejam introduzidos com regularidade.

6. Orientação para a qualidade, com rendimentos de operações elevados e o acompanhamento (*tracking*) de cada lote individualmente.
7. Um elevado grau de automação do processo.

A existência de convergência nestas questões abre o caminho a que, apesar da existência de disparidades profundas entre diferentes casos, estas sejam tratadas com alguns pressupostos comuns, com o intuito de melhorar a qualidade dos resultados obtidos. Retomando a classificação de problemas de planeamento de capacidade apresentado no Capítulo 2.1, estes poderão classificar-se como problemas multiestágio, pela sua necessidade de considerar níveis reduzidos de *stocks*, não só de produtos finais, mas também de produtos intermédios e com procura dinâmica. Os elevados graus de automatização, bem como as exigências ao nível de qualidade, apontam para uma preponderância do fator capital na produção tornando-se a capacidade, assim, uma restrição de elevada importância. A existência de uma unidade produtiva ou a necessidade de considerar uma parte mais significativa da cadeia de abastecimento poderá estar relacionada com uma integração mais horizontal ou mais vertical da empresa. O tratamento da procura como determinística ou estocástica, por sua vez, dependerá não só da volatilidade e instabilidade da mesma, mas também da responsividade que a empresa conseguirá dar à mesma, bem como a sua dependência de previsões de vendas.

3.4. Descrição do processo de planeamento atual

Outra questão determinante, na proposta de um novo sistema de planeamento, é compreender que alterações desencadeará, face aos já em vigor nas empresas-clientes da CMF. Mais uma vez, toma-se o exemplo do planeamento da empresa já referida para a conceptualização.

Na empresa supracitada, a colocação de novas encomendas ocorre com uma frequência diária, uma frequência consideravelmente superior ao que se verifica em outras empresas do mesmo segmento (ver secção 2.3). No entanto, esta instabilidade é contrariada pela sua agregação e lançamento para o processo de planeamento tático, entre uma a duas vezes por mês. Este foca-se num horizonte temporal relativamente curto (1 mês), dada a necessidade de revisão frequente, para contar com ordens de elevada prioridade que sejam lançadas com pouco tempo de antecedência. Pretende-se determinar, a este nível, se é possível ou não cumprir as ordens de produção colocadas e obter a janela temporal e os *leadtimes* em que cada uma será executada. É também com base neste plano que se procede à desagregação da informação, de forma a obter-se o conjunto de tarefas a serem executadas pelo *shop-floor*.

O planeamento operacional, relacionado com este último aspeto, consiste na programação de tarefas nas máquinas, sendo realizado num horizonte temporal de um dia. Possíveis discrepâncias, que possam ter existido entre as tarefas que foram planeadas e a execução das mesmas, como, por exemplo, avarias de equipamentos, são tomados em conta para a realização do planeamento operacional do dia seguinte. Caso estas discrepâncias assumam um impacto significativo a um nível macro, o plano tático é também revisto de forma a acomodar estas circunstâncias.

Em termos estratégicos, dado que a empresa, por regra, não mantém produto acabado em *stock* mais do que o tempo necessário para proceder ao despacho para o cliente, trabalhando num sistema JIT, e com uma volatilidade na procura que dificulta a criação de previsões a longo prazo, não existe a criação de planos de produção a um prazo maior do que o considerado no planeamento tático. Como tal, será um nível que não será tomado em conta para o processo de planeamento proposto no presente projeto. No entanto, deve levar-se em consideração que decisões que se reportam a expansões/reduções de capacidade produtiva, pela natureza da dimensão dos investimentos necessários representam compromissos a longo prazo, são tomadas a um nível mais estratégico, com base na agregação de informações provenientes dos níveis inferiores descritos.

3.5. Interligação com o MES

A integração do planeamento de produção com o sistema MES é uma oportunidade para o alavancar com algumas funcionalidades que o MES oferece. Em primeiro lugar, uma possibilidade interessante seria a obtenção de diversos *inputs* associados ao problema de planeamento diretamente do sistema, garantindo a sua fiabilidade e robustez. Para tal, é necessário compreender a estruturação dos dados no MES, de forma a avaliar quais destes devem ser usados, bem como investigar se deverão ser criadas novas estruturas no MES, para acomodar as necessidades do processo de planeamento.

Na representação que o MES cria de uma dada linha de produção, expressa na Figura 13, os blocos de construção mais elementares são os chamados *Steps*, correspondentes a um passo numa cadeia produtiva. A cada *Step* pode estar associado um *Service*, ou seja, uma operação que qualquer material que achesse esse *Step* deverá sofrer. Tipicamente, apenas se consideram *Steps* sem *Service* quando estes corresponderem a operações de transporte pelo operador. O *Service*, por sua vez, está associado à entidade *Resource*, prestadora do serviço, representativa de uma máquina ou equipamento. Esta entidade, por sua vez, está também relacionada com as informações de engenharia ou manutenção, contendo dados sobre planos preventivos, avarias, *uptime*, entre outros.

Em termos de fluxo de operações, os *Steps* estão organizados em *Flows*, cadeias de operações em que cada *Step* pode ser precedido ou sucedido por apenas um outro *Step*. Desta forma, não é possível definir, ao nível do *Flow*, estruturas *intree*, com mais do que uma precedência, *outtree*, com mais do que uma sucessão, ou uma estrutura *gozinto*, considerando ambas as situações.

No entanto, este tipo de associação pode ser descrito ao nível do *Product*, a entidade que contém toda a informação de um determinado produto/componente/consumível. Entre estas informações, consta a associação a um *Flow*, obrigando a que qualquer *Material*, a entidade correspondente a um lote desse produto existente fisicamente na linha de produção, a ter que atravessar todos os *Steps* do *Flow* associado de forma sequencial.

As relações entre *Products* são feitas na chamada *Bill of Materials*, estipulando-se que consumíveis deverão ser incorporados em cada *Product*, em que *Step* essa operação deverá ocorrer e quais as proporções necessárias. Tal permite descrever, então, as relações que existem entre diferentes *Products* e, indiretamente, os *Flows* que lhes estão associados.

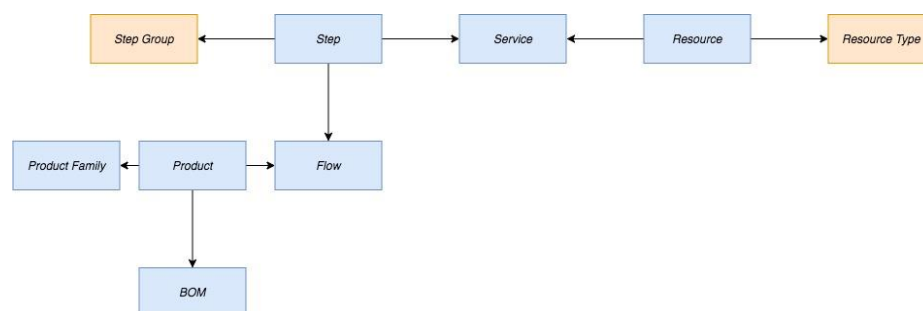


Figura 13 - Estrutura de dados a usar no processo planeamento. Os retângulos a azul correspondem a estruturas/classes já presentes no MES, enquanto os retângulos a laranja são estruturas necessárias para o planeamento ainda não implementadas.

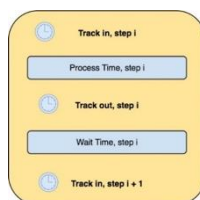


Figura 14 - Possibilidade de extração de dados empíricos do MES para planeamento

Outra estrutura interessante, particularmente para o processo de planeamento a um nível mais agregado, são as chamadas *Product Families*, em que produtos com características semelhantes são agrupados. Dentro desta entidade, encontram-se definidos, pelo cliente, fatores de equivalência entre os diversos produtos e um produto escolhido como referência. Estes fatores refletem uma medida relativa da complexidade de execução de diferentes produtos: tenha-se dois produtos, A e B; A, escolhido como referência e B, com fator de equivalência 2. Suponha-se que a capacidade de produção é conhecida, caso a escolha seja produzir unicamente A, assumindo o valor de 1000 unidades. Assim sendo, dado que a complexidade de produzir B é estimada como sendo o dobro da complexidade de produzir A, prevê-se que a capacidade produtiva de B seja de cerca de 500 unidades, pois, em suma, o planeamento de 1 unidade de B corresponde a planear 2 unidades de A. Esta simplificação de todos os produtos de uma família, ligados a uma única base comum permite, a um planeamento mais agregado, uma poupança importante de variáveis de decisão, quando o objetivo é reportar a situação a um prazo mais longo.

À semelhança do processo de agregação de produtos em famílias, seria também interessante explorar a possibilidade de proceder à agregação ao nível dos recursos. Assim sendo, estudou-se a criação de mais duas entidades: a primeira, o *Step Group*, que consiste na agregação de todos os *Steps* que tenham o mesmo *Service* associado, ou seja, operações semelhantes. Se seguida, o mesmo tipo de agregação foi sujeito ao *Resource*, em que recursos prestadores do mesmo tipo de *Service* são alocados ao mesmo *Resource Type*. Pelo que se acaba de expor, torna-se possível, para um planeamento a um nível mais alto, alocar cada operação, não a um equipamento em particular, mas a um conjunto de equipamentos, cada um capaz de a executar.

Outra dimensão a explorar seria definir que *inputs* deveriam entrar, por inserção direta do utilizador, e quais deveriam ser levantados da base de dados do MES. Apontam-se duas razões para justificar a necessidade de uma introdução manual de dados. A primeira é, simplesmente, a não existência desses dados na estrutura do MES: informações como os rendimentos das operações, as quantidades mínimas para o lançamento de um novo lote, entre outras, não se encontram explicitadas na base de dados; não obstante, no futuro, estas poderão ser integradas. A segunda está relacionada com informações e parâmetros que se prevejam que possam ser usadas na criação de cenários: quer sejam parâmetros de decisão, como a permissão de atrasar ordens de produção, os pesos dados aos custos de manutenção de inventário, entre outros; quer sejam parâmetros do processo que, apesar de, na realidade, não variarem consoante o plano, são frequentemente utilizados pelo planeador para manipular e testar diferentes cenários: tome-se como exemplo, o *uptime* médio dos grupos de recursos e os tempos de processamento das operações.

A natureza dos dados a utilizar, por sua vez, levanta também questões importantes. No MES coexistem dois tipos de dados: dados teóricos também chamados de paramétricos - resultantes da atribuição de valores por parte do utilizador; e dados empíricos - obtidos do histórico de funcionamento registado na base de dados. A título de exemplo, a Figura 12 mostra como os registos de movimentos de *batches* podem ser usados para extrair o tempo de processamento de uma certa operação. Para muitos parâmetros, como sejam o *uptime* médio dos recursos e os

tempos de processamentos das operações, seria possível, no limite, obter valores por ambas as abordagens, colocando-se assim a dúvida de quais devem ser considerados para efeitos de planeamento. O valor paramétrico tem as vantagens de ser estável, de simples acesso, do ponto de vista do sistema e ser conhecido à partida pelo utilizador. Por outro lado, como referido anteriormente, a utilização de parâmetros ajustáveis permite estudarem-se diferentes cenários, ignorando-se por completo as variabilidades existentes nos processos reais, variabilidades essas que podem ter impactos significativos na execução do processo. Os valores históricos abrem a possibilidade para um tratamento estocástico dos dados, mais coerente com a realidade, mas requerem uma análise prévia, com vista à eliminação de *outliers*, bem como um nível de disciplina na inserção de dados no *shop-floor* que pode ser difícil de implementar.

Por fim, o formato dos *outputs* que se obteriam também deve refletir uma futura integração/articulação com o MES. Por um lado, tendo em conta que o MES trabalha com dados em formato tabular e possui ferramentas de tratamento estatístico poderosas, seria pertinente proceder à impressão de toda a informação obtida de forma desagregada, em formato de tabelas, para posterior análise e tratamento. Por outro lado, dada a natureza iterativa do processo de planeamento, é também importante a obtenção imediata de relatórios sintetizados, na forma tabular e gráfica, que permitam ao utilizador avaliar a qualidade da solução atingida e se esta se alinha com os seus objetivos.

3.6. Outros sistemas de planeamento presentes

Outra funcionalidade do MES que, pelo seu interesse para o presente projeto, deve ser abordada com especial atenção é o sistema de escalonamento de operações. Trata-se de um sistema que aloca um conjunto de tarefas aos diferentes recursos individuais presentes, permitindo ao utilizador ponderar vários critérios de decisão, particularmente, minimizar tempos de preparação ou gastos de energia. Apontam-se as suas capacidades de lidar com situações complexas, envolvendo um grande número de operações e de restrições impostas, bem como a sua *performance*, ao nível da rapidez da geração de uma solução de boa qualidade. Após o processo de otimização, o escalonamento apresenta, também, ao utilizador uma interface que lhe permite fazer pequenos ajustes manuais ou, caso seja necessário, voltar a executar o algoritmo. Isto leva a uma abordagem construtiva na obtenção de uma solução, em que o *know-how* do utilizador é também tido em conta.

Em termos de funcionamento, o agendamento das operações é realizado tendo por base a estrutura do MES com a entidade *Material*, ou seja, já com lotes de processamento reais (existentes fisicamente no *shop floor*), implicando que a antecipação do escalonamento de tarefas em relação à execução das mesmas será bastante reduzida. Neste sentido, para além de uma ferramenta de planeamento, o sistema de escalonamento tem a potencialidade de ser uma poderosa ferramenta de controlo quase em tempo real da execução das operações.

No entanto, esta configuração pode apresentar entraves à utilização deste sistema. A necessidade de existirem *Materials* reais para o seu funcionamento limita-o à geração de planos para um espaço temporal próximo do momento em que é executado. Por outro lado, a sua existência, sem o auxílio de um modelo que faça o *breakdown* de uma ordem de produção nas quantidades a serem executadas em cada período, é também um obstáculo à utilização para lidar com situações de cenários de planeamento. Por fim, o tratamento das precedências é, mais uma vez, feito ao nível dos *Materials*, não entrando com as relações expressas na BOM. Isto implica que, embora seja possível obter uma data de execução para todas as *Steps* do *Flow* do *Material* que corresponde ao produto acabado, não é possível obter essa mesma informação para o *Flow* dos *Materials* que correspondem a componentes incorporados nesse produto final.

4. Apresentação da solução

O presente capítulo prende-se com a descrição em detalhe da solução encontrada para os problemas de planeamento propostos. Em primeiro lugar, serão analisados, de forma independente, os dois níveis de planeamento em que o problema da CMF se enquadra: o nível tático e o nível operacional. Para cada um destes, é proposto um modelo de programação matemática, captando-se quais as particularidades do processo produtivo que cada um destes deverá retratar.

Estando definidos os modelos, procurou-se uma interdependência no funcionamento destes níveis, pretendendo-se chegar a uma complementaridade de resultados de ambos. Desta forma, retomou-se o conceito de planeamento hierárquico, introduzido no Capítulo 2.2, propondo-se um modo de operação coerente com os conceitos aí apresentados. De forma a alinhar o funcionamento da ferramenta com as práticas de planeamento já em vigor na indústria, adotou-se o horizonte rolante, como estratégia para manter controlada a complexidade dos modelos desenvolvidos, e permitir uma revisão frequente das conclusões extrapoladas.

4.1. Planeamento tático - Médio prazo

O primeiro passo na solução proposta passa por um planeamento a médio prazo, com vista a determinar a janela temporal de execução de cada *ordem de produção*, bem como obter uma lista de quais destas terão que ser realizadas no período escalonado/detalhado. Assim sendo, escolhe-se um horizonte temporal entre 6 meses e 1 ano, dividido em períodos de 1-2 semanas. A este nível mais abrangente, os desafios que a empresa enfrenta, na ausência de *setups* tão restritivos que obriguem à alocação de períodos semanais à produção de cada um dos produtos, prendem-se essencialmente com a questão da verificação da capacidade disponível, ou seja, se a disponibilidade dos recursos é suficiente para a procura, bem como a gestão de inventário, de expedição e de espaço de armazém necessário a médio prazo e a análise de possíveis atrasos e necessidades de renegociar datas finais de entrega.

Pelo que se acaba de expor, deve ter-se em consideração quais os objetivos pretendidos por parte do departamento de produção, dos quais se apontam quatro possibilidades, definidas por dois fatores. O primeiro prende-se com a proibição, *Early Release*, ou a permissão, *Early or Late Release*, de entregas em atraso. O segundo está relacionado com a implementação das prioridades num sistema *Just-in-Time*, a que se chamou *High Priority*, ou num sistema *Make-to-Stock*, que foi denominado de *Low Priority*.

Early Release/High Priority

Com este critério, assume-se que a prioridade das encomendas reflete a inflexibilidade do cumprimento dos prazos estabelecidos. Sabendo que a capacidade de armazenamento da fábrica é limitada, admite-se que a satisfação da encomenda é cumprida de forma faseada, com a quantidade total a ser dividida num número de expedições de menor dimensão.

Com esta lógica, um cliente que trabalhe num sistema JIT não ficaria satisfeito caso a empresa comesse a expedir os seus produtos com demasiada antecipação; tendo em conta as considerações feitas, tal obrigaria a fábrica a processar essa ordem o mais próximo possível da data limite imposta pelo cliente. Por outro lado, um cliente menos exigente, ou possível detentor de instalações físicas capazes de acomodar o *stock* de produtos adquiridos, poderia aceitar receber a sua compra com maior antecipação, havendo maior liberdade para agendar a sua ordem de produção.

Neste sistema, assume-se que uma prioridade elevada corresponde a um cliente mais exigente em termos de JIT do que uma prioridade mais baixa, sendo esta uma escala representada através de um índice decrescente: com 1 a corresponder à prioridade máxima. Estando o processo de expedição do produto final fora do âmbito deste projeto, a procura associada a cada encomenda será modelada como um acontecimento pontual.

Havendo esta discrepância entre modelo e realidade, é necessário refletir sobre como traduzir os objetivos pretendidos na situação descrita pelo modelo. Como tal, se se procurar que o *stock* de produto final esteja concentrado em poucos períodos e o mais próximo possível da data de entrega, isto corresponderia, na realidade, à entrega do produto próximo da data em que o cliente efetivamente necessita, cumprindo com a estratégia de JIT. Ao invés, um elevado nível total de *stock* espaçado no tempo traduziria (tendo em conta os limites de armazenamento da empresa) a necessidade de enviar o produto com maior antecedência. A primeira situação seria o desejável para ordens de elevada prioridade, e a segunda tolerável para encomendas menos importantes.

Note-se que, neste sistema, a entrega em atraso não é tolerável.

Early Release/Low Priority

Neste critério, a lógica anterior é revertida, pretendendo-se um sistema mais *make-to-stock* das ordens de produção mais importantes, como forma de as proteger contra possíveis imprevistos e avarias na linha, com as encomendas de menor prioridade a serem efetuadas mais próximas da data de entrega, com todos os riscos que tal decisão possa acarretar. À semelhança do sistema anterior, não são permitidas entregas em atraso.

Early or Late Release/High Priority

Caracteriza-se por ser semelhante ao critério Early Release/High Priority, mas admitindo a possibilidade de entregas em atraso. Mais uma vez, assume-se, que ordens de elevada prioridade implicam um maior cumprimento das datas de entrega, enquanto ordens de baixa prioridade podem divergir do seu prazo. Para este tipo de modelo, deve ser definida qual a diferente predisposição do cliente em aceitar entregas antecipadas/atrasadas, penalizando de forma diferente os *stocks* correspondentes a estes dois tipos de entregas. Para existir uma maior flexibilidade, pode também ser interessante definir, para cada encomenda, a possibilidade ou não de existência de entregas antecipadas/atrasadas, ou uma prioridade mínima, abaixo da qual não são permitidos atrasos.

Early or Late Release/Low Priority

Verificam-se semelhanças relativamente ao critério Early Release/Low Priority, mas admitindo a possibilidade de entregas em atraso. Assume-se, mais uma vez, que ordens de elevada prioridade implicam uma realização o mais antecipada possível, e que menores prioridades admitem maiores atrasos na entrega ao cliente. Novamente, as duas considerações expressas no critério Early or Late Release/High Priority devem ser tidas em conta para a elaboração do objetivo do cliente.

Modelo Matemático

Abaixo apresenta-se a formulação matemática para o critério ELR/HP, baseada na formulação do *capacitated multi-stage lot-sizing problem* (CMSLSP):

$$\text{Minimizar } Z1 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S (\min(u) - u_s + 1)(h_{it} \cdot I_{its}^+ + g_{it} \cdot I_{its}^-) + \sum_{s=1}^S (M \cdot (proc_s - C_s)) \quad (4.1)$$

Sujeito a

$$C_s \leq P_u \cdot proc_s, \forall s: u_s > 1 \quad (4.2)$$

$$\sum_{s'=prior(u)} C_{s'} \geq P_{(u+1)} \cdot \sum_{s'=prior(u)} proc_s, \forall u = 1, \dots, U \quad (4.3)$$

$$I_{i(t-1)s}^+ - I_{its}^+ + X_{its} = 0, I_{its}^- = 0, \forall i \in 1, \dots, N_i; s = 1, \dots, S; t = 1, \dots; dd_s - 1 \quad (4.4)$$

$$I_{i(t-1)s}^+ - I_{its}^+ + I_{its}^- - X_{its} = C_s, I_{its}^- - I_{i(t+1)s}^- = 0, \forall i \in 1, \dots, N_i; s = 1, \dots, S; t = dd_s \quad (4.5)$$

$$I_{i(t-1)s}^+ - I_{its}^+ = 0, I_{its}^- - I_{i(t+1)s}^- + X_{its} = 0, \forall i \in 1, \dots, N_i; s = 1, \dots, S; t = dd_s + 1, \dots, N \quad (4.6)$$

$$I_{j(t-1)}^+ - I_{jt}^+ + r_j \cdot pb_j \cdot X_{jt} = \sum_{l \in suc(j)} a_{jl} \cdot pb_l \cdot X_{lt} + \sum_{m \in suc(j)} \sum_{s \in enc(m)} a_{jm} \cdot X_{mts}, \forall j \in 1, \dots, N_j; t = 1, \dots; T \quad (4.7)$$

$$\sum_{l \in work(k)} p_{lk} \cdot X_{lt} \leq d \cdot n_k \cdot up_k, \forall k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (4.8)$$

$$I_{its}^+, I_{its}^-, X_{its}, X_{jt} \geq 0 \quad (4.9)$$

$$0 \leq C_s \leq proc_s \quad (4.10)$$

$$I_{jt}^+ = 0 \quad (4.11)$$

Onde:

Índices e Conjuntos:

t	Período
i, m	Produtos acabados
j, l	Componentes/Produtos intermédios
k	Tipo de Recurso com Restrições de Capacidade
s, s'	Encomenda do Cliente
$suc(j)$	Conjunto de Sucessores Diretos do Componente j
$enc(i)$	Conjunto de Encomendas feitas para o produto i
$work(k)$	Conjunto de Componentes processados por recursos do tipo k
$prior(u)$	Conjunto de todas as Encomendas com a prioridade u
$\min(u)$	Prioridade mínima de todas encomendas (ou seja, o valor mais alto da escala de prioridades)

Parâmetros:

u_s	Prioridade da encomenda s
dd_s	Período de entrega da encomenda s
h_{it}	Penalização por manter, em <i>stock</i> , uma unidade do produto i no período t

g_{it}	Penalização por unidade do produto i no período t mantida para satisfazer encomendas em atraso
pb_j	Tamanho do <i>batch</i> em que o componente j é processado
p_{jk}	Tempo de processamento de um <i>batch</i> do componente j no recurso k , em minutos
a_{jl}	Consumo do componente j para o fabrico do componente l
d	Duração de um período t , em minutos
n_k	Número de recursos do tipo k , em qualquer período t
up_k	<i>Uptime</i> médio do recurso k
M	Constante suficientemente grande
$proc_s$	Procura associada à encomenda s
r_j	Rendimento na obtenção do componente j

Variáveis de Decisão:

P_u	Permissão para produzir ordens de prioridade u
I_{its}^+	Quantidade de <i>stock</i> do produto i no período t para satisfazer a encomenda s
I_{its}^-	Quantidade de <i>stock</i> do produto i no período t para satisfazer a encomenda s em atraso
I_{jt}^+	Quantidade de <i>stock</i> do componente j no período t
X_{its}	Quantidade produzida no período t do produto i para satisfazer a encomenda s
X_{jt}	Número de <i>batches</i> produzidos no período t do componente j
C_s	Quantidade entregue ao cliente da encomenda s

A função objetivo, expressa em (4.1), minimiza os custos associados à procura não satisfeita, expressa no segundo membro, e os custos de manutenção de produto acabado em inventário. É necessário ter em atenção que o objetivo de cumprir as ordens de produção tem primazia absoluta sobre os custos de inventário, mesmo que estes assumam valores consideráveis. Como tal, na ausência de valores referentes aos custos de procura insatisfeita e de manutenção de inventário, estabelece-se que o custo de não entregar uma unidade do produto i é igual ao custo da sua manutenção em inventário durante a totalidade do horizonte de planeamento. Nota-se também que, atendendo à imposição de um critério JIT, os custos de inventário são ponderados pela prioridade da ordem de produção, tornando-se cada vez menos punitivo manter *stock* à medida que a prioridade da ordem diminui (o seu índice aumenta).

Tendo em consideração a existência de diferentes prioridades para as ordens de produção, devem-se estipular as suas dependências: que as ordens de prioridade mais baixa apenas devam ser cumpridas se for possível agendar as de prioridade superior. Esta imposição é efetuada nas condições (4.2) e (4.3).

As condições (4.4), (4.5) e (4.6) traduzem o equilíbrio de inventários para os produtos finais: quer para o caso de se tratar de um inventário físico, mantido desde a data de produção até à data de entrega; quer seja do *backlog*, para entregas posteriores à data de entrega. Dado que estas duas situações acarretam diferentes inconvenientes, podendo mesmo as entregas em atraso estarem restringidas para certas ordens de produção, é necessário imputar as quantidades produzidas às variáveis representativas dessa situação, I_{its}^+ ou I_{its}^- , consoante se esteja numa situação de antecipação ou de atraso.

As condições (4.7), por sua vez, relacionam-se com o equilíbrio de inventário para componentes intermédios. Nestas destaca-se que a procura para um dado componente pode assumir duas naturezas: uma procura interna, como consumo para a criação de outro componente mais a jusante no processo produtivo, expressa pelo termo $\sum_{l \in Suc(j)} a_{jl} \cdot p_{bl} \cdot X_{l(t+1)}$, e uma procura externa, associada à decisão de realizar uma entrega de produto acabado ao cliente, representada pelo termo $\sum_{m \in Suc(j)} \sum_{s \in Enc(m)} a_{jm} \cdot X_{m(t+1)s}$.

Por fim a restrição (4.8) relaciona-se com uma verificação de capacidade, comparando a carga em horas, colocada em cada recurso em cada período considerado, com a capacidade disponível. Nesta última considera-se a existência de um fator de *uptime*, representativo da parcela do tempo total que corresponde efetivamente a tempo útil.

Tratando-se este de um processo de planeamento com um grau de agregação temporal considerável, não faria sentido permitir a possibilidade de manter componentes intermédios em *stock* entre períodos, sendo esta restringida em (4.11). Além disso, considera-se contínua a quantidade de *batches* a ser produzida, correspondendo a sua parcela decimal a um lote incompleto.

Deve-se ter em consideração que a passagem do critério *ELR/HP* para o critério *ELR/LP* implica apenas uma reversão dos pesos do inventário na função objetivo, passando esta a tomar a seguinte forma:

$$Z2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S u_s \cdot (h_{it} \cdot I_{its}^+ + g_{it} \cdot I_{its}^-) + \sum_{s=1}^S (M_s) \cdot (proc_s - c_s) \quad (4.12)$$

Por outro lado, de forma a obter-se o critério *ER/HP* a partir do critério *ELR/HP* e o critério *ER/LP* com base no critério *ELR/LP* respetivamente, devem ser eliminadas do problema as variáveis I_{its}^- , por exemplo, acrescentando a seguinte restrição:

$$I_{its}^- = 0, \forall i = 1, \dots, N \quad (4.13)$$

Como *output* deste modelo, obtém-se um valor alvo da produção a atingir em cada semana, a posição da execução de cada ordem de produção no horizonte alargado, o seu *leadtime* e a sua dispersão em relação à sua data de entrega com os atrasos e antecipações subjacentes, uma ideia de necessidades a nível de espaço de armazenamento caso esta dispersão seja considerável, bem como um primeiro resumo da carga colocada em cada tipo de recurso, indicando quais destes estão a restringir o *throughput* do processo, ou seja, os *bottlenecks* a médio prazo.

A obtenção de um plano não admissível a este nível pode-se prender com questões estruturantes para a empresa, como sejam uma capacidade instalada insuficiente para o nível de procura imposto, um nível de fiabilidade dos equipamentos inadequado, ou o lançamento de ordens de produção sem antecipação suficiente. A obtenção de um plano admissível, por sua vez, implica uma passagem para o nível inferior, que será responsável pela desagregação da informação obtida por este modelo numa granularidade temporal maior e pelo confronto com as características operacionais do *shop floor*.

4.2. Planeamento Operacional - Curto prazo

Estando o planeamento a um médio nível realizado, torna-se necessário refletir sobre como executar as ordens de produção nas linhas de produção. Aqui entram em linha de conta várias questões previamente ignoradas no modelo de médio nível: a existência de *leadtimes* com variabilidade significativa entre operações, a necessidade de garantir o reabastecimento dos *buffers*, o não ultrapassar a capacidade dos mesmos, a necessidade de maximizar localmente a

utilização de certos recursos, e a perecibilidade de alguns componentes. Estas condições, por via de se colocarem num nível operacional, não podem ser declaradas explicitamente no nível agregado anteriormente descrito, mas como implicam operações de agregação e desagregação de lotes, não se enquadram no âmbito de um escalonamento.

Sendo assim, elabora-se um novo planeamento a um horizonte mais curto, de 2 a 4 semanas, com uma precisão temporal na casa de 1 a 4 horas. Desta forma, é possível representar as condicionantes necessárias para a criação de uma janela temporal para a execução de cada conjunto de operações em cada linha de produção.

Apresenta-se de seguida a formulação para este modelo, mais uma vez baseado na formulação do *capacitated multi-stage lot-sizing problem* (CMSLSP):

$$\text{Minimizar } Z3 = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^S (\min(u) - u_s + 1)(h_{it} \cdot I_{its}^+ + g_{it} \cdot I_{its}^-) + \sum_{j=1}^{N_j} (f_j \cdot Cap_{jt}^- + h_j' \cdot I_{jt}) \right] + \sum_{s=1}^S M \cdot C_s \quad (4.14)$$

Sujeito a:

$$C_s \leq P_u \cdot proc_s, \forall s: u_s > 1 \quad (4.15)$$

$$\sum_{s'=prior(u)} C_{s'} \geq P_{(u+1)} \cdot \sum_{s'=prior(u)} proc_{s'}, \forall u = 1, \dots, U \quad (4.16)$$

$$I_{i(t-1)s}^+ - I_{its}^+ + X_{its} = 0, I_{its}^- = 0, \forall i \in 1, \dots, N_i; s = 1, \dots, S; t = 1, \dots, dd_s - 1 \quad (4.17)$$

$$I_{i(t-1)s}^+ - I_{its}^+ + I_{its}^- + X_{its} = C_s, I_{its}^- - I_{i(t+1)s}^- = 0, \forall i \in 1, \dots, N_i; s = 1, \dots, S; t = dd_s \quad (4.18)$$

$$I_{i(t-1)s}^+ - I_{its}^+ = 0, I_{its}^- - I_{i(t+1)s}^- + X_{its} = 0, \forall i \in 1, \dots, N_i; s = 1, \dots, S; t = dd_s + 1, \dots, N \quad (4.19)$$

$$I_{j(t-1)} - I_{jt} + r_j \cdot pb_j \cdot X_{j(t-td_j+1)} = \sum_{l \in suc(j)} a_{jl} \cdot pb_l \cdot X_{l(t+1)} + \sum_{m \in suc(j)} \sum_{s \in enc(m)} a_{jm} \cdot X_{m(t+1)s} \quad \forall j \in 1, \dots, N_j; t = 1, \dots, T \quad (4.20)$$

$$X_{jt} \leq Y_{jt}, \forall j = 1, \dots, N_j; t = 1, \dots, T \quad (4.21)$$

$$Y_{jt} \cdot ls_j \leq pb_j \cdot X_{jt} + Cap_{jt}^-, \forall j = 1, \dots, N_j; t = 1, \dots, T \quad (4.22)$$

$$\sum_{l \in work(k)} d \cdot up_k (\sum_{t'=t-td_l+2}^t X_{lt'}) + \sum_{l \in work(k)} \sum_{l \in work(k)} p_{lt}' X_{l(t-td_l+1)} \leq up_k \cdot n_k \cdot d, \forall k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (4.23)$$

$$r_j \cdot pb_j \cdot X_{jt} \leq \sum_{t'=t+td_j-1}^{t+td_j-1+e_j} (\sum_{l \in suc(j)} a_{jl} \cdot pb_l \cdot X_{l(t+1)}) , \forall j = 1, \dots, N_j; t = 1, \dots, T \quad (4.24)$$

$$I_{its}^+, I_{its}^-, X_{its}, X_{jt} \geq 0 \quad (4.25)$$

$$I_{jt}^{min} \leq I_{jt} \leq I_{jt}^{max} \quad (4.26)$$

$$Cap_{jt}^- \geq 0 \quad (4.27)$$

$$Y_{it} \in \mathbb{N} \quad (4.28)$$

$$X_{its} \geq 0 \quad (4.29)$$

$$P_u \in \{0,1\} \quad (4.30)$$

$$0 \leq C_s \leq proc_s \quad (4.31)$$

Onde:Índices e Conjuntos:

t	Período
i, m	Produtos acabados
j, l	Componentes/Produtos intermédios
k	Tipo de Recurso com Restrições de Capacidade
s, s'	Encomenda do Cliente
$suc(j)$	Conjunto de Sucessores Diretos do Componente j
$enc(i)$	Conjunto de Encomendas feitas para o produto i
$work(k)$	Conjunto de Componentes processados por recursos do tipo k
$prior(u)$	Conjunto de todas as encomendas com a prioridade u
$min(u)$	Prioridade mínima de todas encomendas (ou seja, o valor mais alto da escala de prioridades)

Parâmetros:

u_s	Prioridade da encomenda s
dd_s	Período de entrega da encomenda s
h_{it}	Penalização por manter em <i>stock</i> uma unidade do produto i no período t
g_{it}	Penalização por unidade do produto i no período t para satisfazer encomendas em atraso
h'_j	Penalização por manter em <i>stock</i> uma unidade do componente j em qualquer período
f_j	Penalização por lançamentos ineficientes do componente j
pb_j	Tamanho do <i>batch</i> em que o componente j é processado
p_{jk}	Tempo de processamento de um <i>batch</i> do componente j no recurso k , em minutos
a_{jl}	Consumo do componente j para o fabrico do componente l
av_k	Disponibilidade de cada um dos recursos do tipo k em qualquer período t , em minutos
n_k	Número de recursos do tipo k , em qualquer período t
up_k	<i>Uptime</i> médio do recurso k
M	Constante suficientemente grande
$proc_s$	Procura associada à encomenda s
r_j	Rendimento na obtenção do componente j

e_j	Tempo máximo de armazenamento do componente j em inventário
td_j	Número de períodos necessários para o processamento do componente j
d	Duração do período
p'_{jk}	O remanescente de p_{jk} após a sua distribuição por períodos integrais de processamento, ou seja, $p'_{jk} = p_{jk} - (td_j - 1) \cdot d \cdot up_k$
ls_j	Quantidade mínima do produto i que pode ser processada em qualquer período. Caso não exista para um dado i, colocar o valor de 0

Variáveis de Decisão:

P_u	Permissão para produzir ordens de prioridade u
I_{its}^+	Quantidade de <i>stock</i> do produto i no período t para satisfazer a encomenda s
I_{its}^-	Quantidade de <i>stock</i> do produto i no período t para satisfazer a encomenda s em atraso
I_{jt}^+	Quantidade de <i>stock</i> do componente j no período t
C_s	Quantidade entregue ao cliente da encomenda s
X_{its}	Quantidade produzida no período t do produto i para satisfazer a encomenda s
X_{jt}	Número de <i>batches</i> do produto final j cuja produção é iniciada no período t. Tratando-se de uma variável contínua, trata-se a parte decimal como sendo um lote incompleto. Exemplo: 3,5 <i>batches</i> equivale a 4 <i>batches</i> , com um dos mesmos a ter metade da quantidade nominal
Y_{jt}	Número de <i>batches</i> do produto final j cuja produção é iniciada no período t. Trata-se de uma variável inteira que majora a variável X_{jt} homóloga
Cap_{jt}^-	Diferença entre a quantidade planeada caso todos os <i>batches</i> fossem lançados com o seu tamanho nominal, pb_j , e a quantidade efetivamente planeada

A função objetivo (4.14) apresenta características semelhantes às observadas no plano de médio prazo, contendo novamente um termo referente ao cumprimento da procura, de forma a evitar a inadmissibilidade do modelo caso não seja possível cumprir toda a procura, e também uma penalização de manutenção de inventário de produto final. Existem, no entanto, novos efeitos ponderados, expressos no termo $\sum_{j=1}^{N_j} (f_j Cap_{jt}^- + h'_j I_{jt}^-)$: a primeira parcela refere-se às ineficiências de lançamento de *batches* incompletos em equipamentos com elevado gasto energético, e o segundo é uma penalização da existência de inventário nos *buffers* da linha de produção.

As restrições (4.15)-(4.16) e (4.17)-(4.19) são em tudo semelhantes às suas homólogas no modelo de médio prazo, impondo a hierarquia entre prioridades de produção e a manutenção do *stock* de inventário de produto final/satisfação da procura.

As expressões (4.20), à semelhança das restrições correspondentes no modelo anterior, são responsáveis pela criação de uma procura interna entre componentes, e pela manutenção do fluxo de material entre componentes predecessores/sucessores. Existe, no entanto, uma diferença significativa, decorrente da maior granularidade assumida a este nível: a necessidade de considerar os *leadtimes* de execução das operações. Este desfasamento temporal é expresso entre o momento de lançamento de produção do lote na linha,

contabilizado pelo termo $r_j \cdot pb_j \cdot X_{j(t-t_d_j+1)}$, e a sua entrada no *buffer* a jusante da operação, expresso por I_{jt} . A diferença entre estes dois momentos é calculada tendo em conta o tempo de processamento, e a disponibilidade oferecida por cada um dos recursos associados, obtida pelo produto entre a duração do período e um valor médio de *uptime*. No limite, um tempo de processamento inferior a este último valor implica o início de produção no início do período, e a sua obtenção em inventário no final de período. Para que este desfasamento temporal exista, mesmo na condição exposta anteriormente, impõe-se que componentes existentes em inventário num dado período serão utilizados para satisfazer a procura imposta no período seguinte, como se pode observar nos termos $\sum_{l \in suc(j)} a_{jl} \cdot pb_l \cdot X_{l(t+1)} + \sum_{m \in suc(j)} \sum_{s \in enc(m)} a_{jm} \cdot pb_m \cdot X_{m(t+1)s}$.

As restrições (4.21) e (4.22) prendem-se com a questão da utilização eficiente de recursos com elevados gastos energéticos. A expressão (4.21) procede à contabilização de quantos lotes foram lançados através da variável inteira Y_{jt} , que irá majorar a variável contínua X_{jt} , ou seja, a quantidade, em lotes (completos e incompletos), que foi produzida. Por sua vez, a restrição (4.22) contabiliza qual a diferença entre a quantidade produzida, pelo termo $pb_j X_{jt}$, e a quantidade mínima que esse número de lotes deveria conter no total, expressa pelo termo $Y_{jt} ls_j$, em que ls_j denota qual a quantidade mínima recomendada por lançamento de lote. Esta diferença, caso positiva, é imputada à variável Cap_{jt}^- , que é sujeita a uma penalização na função objetivo.

A verificação da capacidade a este nível é feita pelas restrições (4.23), assumindo uma formulação diferente da utilizada no nível superior. A comparação entre horas de carga e horas de disponibilidade continua a ser feita, mas tendo em consideração, mais uma vez, a existência de operações com tempos de execução superiores à duração do período. Esta realidade obriga a que em cada período sejam contabilizadas não só as cargas colocadas por componentes produzidos neste período, mas possivelmente também componentes cuja produção tenha sido iniciada em produtos anteriores. Assim sendo, subdivide-se o carregamento dos recursos em dois: o termo $\sum_{l \in work(k)} p'_{lt} X_{lt-t_d_l+1}$, correspondente à produção que irá estar concluída num dado período, e o termo $\sum_{l \in work(k)} d \cdot up_k (\sum_{t'=t-t_d_l+2}^t X_{lt'})$, referente à produção que, apesar de não estar concluída pelo final do período em questão, está a utilizar a capacidade dos equipamentos. No primeiro caso, a carga colocada em horas por lote é o remanescente do tempo de processamento quando a este é subtraído o número de períodos inteiros necessários para a execução de um dado componente, sendo este valor dado por $p'_{jk} = p_{jk} - (td_k - 1) \cdot d \cdot up_k$. Note-se que, caso o tempo de processamento de um dado componente seja inferior à duração do período, então $td_k = 1$ e $p'_{jk} = p_{jk}$. No segundo caso, a imputação em termos de horas corresponde à ocupação de um dos recursos do grupo durante a totalidade do período, ou seja, dU_k .

As restrições (4.24) impõem uma condição temporal para o consumo de certos componentes. Esta imposição pode ser colocada por uma de duas razões:

1. O componente é perecível e, caso não seja consumido durante uma certa janela temporal, fica inutilizado;
2. A necessidade de fazer um *tradeoff* entre a eficiência energética e a acumulação de WIP em espera nas operações de agregação de lotes a montante de operações de elevado gasto energético. Assim sendo, impõe-se um tempo máximo de espera para a chegada da quantidade mínima para o lançamento do lote; caso este seja

excedido, a operação deve ser lançada com uma quantidade abaixo da mínima recomendada.

Esta condição estipula que a quantidade de um certo componente j cuja produção é iniciada num dado período t deverá ser inferior ou igual à quantidade consumida em e_j períodos após a produção estar concluída. Assim sendo, a janela temporal para o consumo dessa quantidade inicia-se no período $t + td_j - 1$ em que a produção está pronta e termina no período $t + td_j + e_j - 1$, em que o componente perece.

Em termos de reabastecimento de *buffers*, assume-se em (4.26) um intervalo para os quais os níveis de quantidade mantidas devem variar, colocando-se um valor máximo que denote o espaço físico máximo para o armazenamento, bem como as preocupações num ambiente JIT em minimizar as quantidades de WIP, e também um valor mínimo, funcionando como proteção contra a possibilidade de *starvation* na máquina seguinte.

É importante ter em consideração que este modelo, por tomar em consideração os *leadtimes* do processo, apresenta algumas limitações. Por um lado, em casos de operações cujo tempo de processamento seja significativamente inferior à granularidade escolhida, a obrigatoriedade de impor um *leadtime* entre a operação atual e a próxima implica, na ausência de um nível de planeamento mais detalhado, tempos de espera elevados. Assim sendo, torna-se necessário o confronto dos resultados obtidos neste modelo com o nível de escalonamento, de forma a corroborar a admissibilidade do plano obtido.

Por outro lado, outra falha prende-se com a forma como o tempo de processamento é tratado. Enquanto, para componentes cujo tempo de processamento seja inferior à duração do período, ou seja, em que $td_j = 1$, o tempo de processamento tem uma natureza completamente variável, para componentes em que o tempo de processamento seja superior à duração do período, ou seja, $td_j > 1$, a carga em horas é variável mas a sua distribuição por td_j períodos permanece fixa, mesmo que a carga total seja significativamente inferior à duração total de td_j .

Tome-se como exemplo a situação descrita na Figura 15, em que se observa o carregamento de uma operação com tempo de processamento três vezes superior à duração de cada período, num grupo de 2 máquinas. Observe-se que o lançamento de dois lotes, como o que ocorre em $t=4$, implica a ocupação completa das duas máquinas durante 3 lotes, ou seja, encontra-se de acordo com a situação real. No entanto, caso se escolha lançar 1,5 lotes, ou seja, um lote com pb_j e um segundo com $pb_j/2$, implica o carregamento de uma das máquinas pela duração de 3 períodos, e a outra com uma carga com a duração de 1,5 períodos. No entanto, esta carga distribui-se por $td_j = 3$ períodos, o que implica que o *leadtime* para a obtenção do componente processado nunca será inferior a td_j , mesmo que o processamento do mesmo requisesse um número inferior de períodos: 2, como o caso de lote com $pb_j/2$.

Este erro é, no entanto, mitigado por dois fatores:

- No processo tomado como exemplo, as operações com menores tempos de processamento tendem a ter um processamento sequencial (tempo de processamento fortemente dependente da quantidade), com as operações com processamento simultâneo (tempo de processamento independente da quantidade), como sejam as curas em fornos, a ser as que possuem os tempos de processamento mais morosos, na casa de 6-8 horas. Deve-se, por isso, procurar uma granularidade ao nível da duração do período que melhor permita retratar estas duas realidades contrastantes.

- As operações mais morosas anteriormente descritas têm também normalmente associadas restrições de quantidades mínimas por lote produzido, tornando-se mais uma força para evitar a situação descrita no ponto 1.

Batches Produzidos	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
SKU - 1	1,5			2		

Carga no Grupo de Recursos	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	Máx
RG - 1	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0

Carga nos Recursos	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6
RG - 1/1						
RG - 1/2						

Figura 15 - Erro cometido pelo planeamento detalhado a nível dos tempos de processamento superiores à granularidade escolhida

Deste passo de planeamento obtém-se as quantidades a serem processadas em cada conjunto de recursos, bem como o prazo que a cadeia de operações tem de respeitar. É possível também ver como decisões de trabalhar com diferentes limitações, a nível de tempos de agregação de lotes, podem levar a diferentes níveis de procura satisfeita, de utilização da capacidade instalada e também de cumprimento dos objetivos energéticos. Por outro lado, também como consequência destas imposições, é possível verificar se as quantidades obtidas na solução, como *o stock* nos *buffers*, se enquadram dentro das características da linha de produção.

Todos estes fatores são também responsáveis pela maior ou menor admissibilidade do plano obtido no nível superior. Situações em que se verifique que a procura inicialmente sugerida pelo modelo a médio prazo é incompatível com as características da linha de produção, ou que, pelo contrário, o nível de produção leva a uma baixa utilização dos recursos durante o período analisado, podem implicar um reajuste ao planeamento geral. Esta reação envolve a alteração dos parâmetros deste último, tendo em conta as implicações que estes efeitos a um nível micro têm no nível macro, e que serão abordadas no Capítulo 4.3.

4.3. Planeamento hierárquico em horizonte rolante

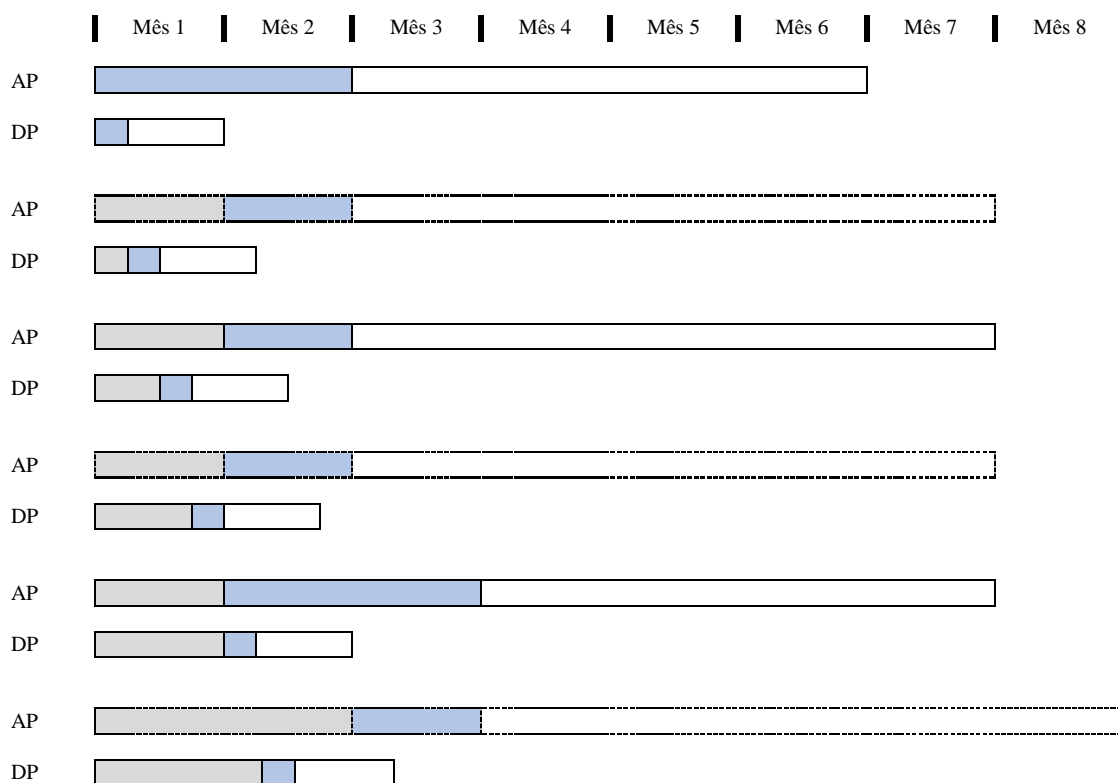


Figura 16 - Sistema de planeamento rolante proposto. Note-se que os planeamentos definidos a traço descontínuo serão iterações opcionais, tendo em conta a periodicidade definida para o planeamento agregado

□ Horizonte a planear ■ Horizonte a planear e implementar ■ H. Implementado

De forma a enquadrar as duas vertentes do planeamento, é necessário integrá-las num sistema de planeamento. Uma das hipóteses envolve a utilização de um horizonte rolante, em que os primeiros períodos do horizonte vão sendo sucessivamente implementados e excluídos do planeamento. Segundo esta abordagem, o horizonte de planeamento é dividido em duas parcelas: a primeira, mais curta, em que se procede a um planeamento com um detalhe mais considerável, e a segunda, mais longa, em que o planeamento é feito de forma mais agregada. Esta divisão entre dois níveis de detalhe é identificável com os dois modelos anteriormente propostos, aplicando-se assim o modelo tático ao horizonte de análise agregada e o modelo operacional à janela temporal de análise detalhada.

Tendo sido adotado um funcionamento hierárquico entre os dois níveis de planeamento, a execução de cada um dos modelos, apesar de empregar informações provenientes do outro, é feita de forma independente, por oposição a um funcionamento integrado, em que a execução seria simultânea. Assim sendo torna-se então necessário abordar a questão de como articular os avanços de cada um dos horizontes, de forma a que os *inputs* e os *feedbacks* necessários para a execução dos modelos complementares estejam presentes.

No nível superior, executa-se o planeamento a um prazo de 24 semanas, com a implementação a ser realizada ao nível das 4 semanas. Pretende-se que este plano seja executado entre uma a duas vezes ao mês. O avanço deste horizonte ocorre sempre antes da entrada do horizonte do modelo de nível inferior num novo mês, necessitando por isso da definição prévia das ordens de produção a serem colocadas nesse novo intervalo de tempo.

No nível inferior, o planeamento é feito num horizonte de 4 semanas, sendo a implementação do plano feita semanalmente, ou seja, sempre que o horizonte é rolado, procede-se ao avanço de uma semana. Em adição a este período, em que as variáveis de decisão podem assumir

diferentes valores dentro do espaço admissível estipulado pela restrições do modelo, a semana imediatamente anterior ao primeiro período é também utilizada, mas, no seu caso, as suas variáveis já são assumidas como implementadas, estão fixas e não podem sofrer alterações. Esta semana é utilizada para se obter o estado inicial do horizonte de planeamento, quer a nível de inventário inicial, quer a nível de WIP que ainda se encontre em processamento nas máquinas e que não possa ser contabilizado como terminado no início do período.

Dado que esta se trata de uma metodologia de planeamento dinâmica, a ser realizada de forma contínua, é necessário ponderar em que momentos deverão existir trocas de informação entre os resultados obtidos em níveis distintos, e também que informação deverá ser tida em conta entre diferentes iterações do mesmo nível. Assim sendo, destacam-se três momentos em que é necessária a obtenção de um *feedback* de forma a prosseguir com o processo: a instrução, o avanço e a reacção.

4.3.1 Instrução

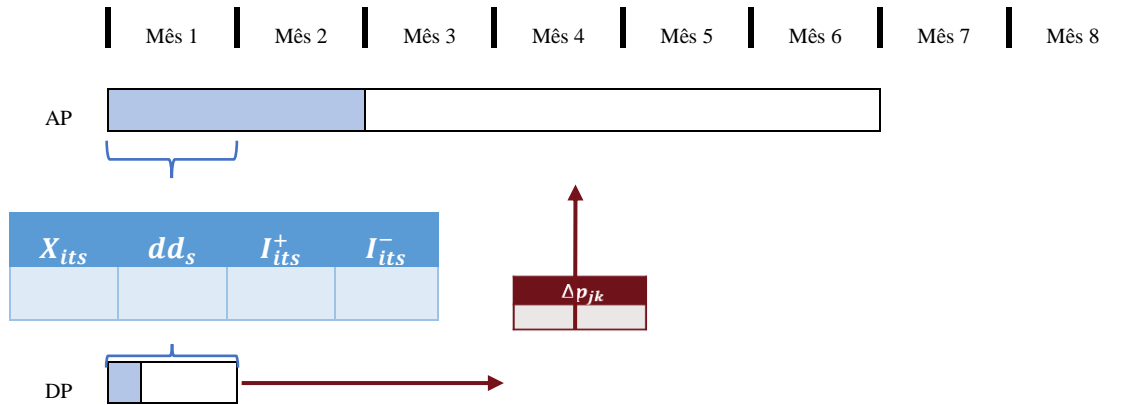


Figura 17 - Instrução na primeira iteração

Como se pode observar na Figura 17, a execução do modelo tático resulta num plano de produção global para o horizonte de seis meses. Destes seis meses, seleccionam-se as quatro primeiras semanas para implementação e, para esse propósito, são extraídos os valores da produção semanal, a serem utilizados para o passo de instrução.

A transformação dos dados agregados, mensais, em dados desagregados foi feita através da definição de metas semanais para o sistema produtivo, podendo estas assumir três formas:

1. A existência de um valor de inventário de produto final numa dada semana do horizonte a implementar, I_{its}^+ , é transformado num nível a atingir no período homólogo no planeamento detalhado, o parâmetro $I_{ts}^{TARGET+}$. Considera-se que o objectivo é desrespeitado se o inventário obtido for inferior ao estipulado, não devendo existir uma penalização adicional caso exista um excesso. Para este efeito, operam-se as seguintes modificações ao planeamento detalhado, apresentado no Capítulo 4.2:

Substituir (4.14) por:

$$\text{Minimizar } Z4 = Z3 + \sum_{i=1}^N \sum_{s \in enc(i)} \sum_{t \in targ} M(I_{its}^{TARGET+} - C_{its}^+) \quad (4.32)$$

Acrescentar as restrições:

$$0 \leq C_{its}^+ \leq I_{its}^{TARGET+} \quad (4.33)$$

$$C_{its}^+ \leq I_{its}^+ \quad (4.34)$$

Onde:

Índices e Conjuntos

targ Períodos com metas associadas, ou seja, períodos correspondentes ao fim de cada semana

Parâmetros

$I_{its}^{TARGET+}$ Meta para o inventário do produto *i* para a encomenda *s* e para o período *t*

Variáveis de decisão

C_{its}^+ Quantidade cumprida da meta de inventário

2. A existência de uma entrega ao cliente final, expressa pela variável C_s no planeamento agregado. Esta é transformada num valor de procura, $proc_s$, no planeamento detalhado, colocado no período homólogo;
3. A existência de um valor de *backlog* de produto final numa dada semana do horizonte a implementar, I_{its}^- , é transformado num nível a não ultrapassar no período homólogo no planeamento detalhado, o parâmetro $I_{its}^{TARGET-}$. Considera-se que o objectivo é desrespeitado se o *backlog* obtido for superior ao estipulado, não se impondo uma nova penalização por níveis de *backlog* inferiores aos estipulados. Nesta sequência, implementam-se as seguintes modificações ao planeamento detalhado, apresentado no Capítulo 4.2:

Substituir (4.14) por:

$$\text{Minimizar } Z5 = Z3 + \sum_{i=1}^N \sum_{s \in enc(i)} \sum_{t \in targ} M(C_{its}^- - I_{its}^{TARGET-}) \quad (4.35)$$

Acrescentar as restrições:

$$I_{its}^{TARGET-} \leq C_{its}^- \quad (4.36)$$

$$C_{its}^- \geq I_{its}^- \quad (4.37)$$

Onde:

Parâmetros

$I_{its}^{TARGET-}$ Meta para o *backlog* do produto *i* para a encomenda *s* e para o período *t*

Variáveis de decisão

C_{its}^- Quantidade de *backlog* em excesso da meta estabelecida

A resolução do planeamento detalhado, tendo em consideração a imposição destes parâmetros, para além da obtenção de um plano operacional, permite também obter duas métricas utilizadas para avaliar a admissibilidade dos parâmetros passados pelo passo de instrução.

A primeira, trata-se do desvio entre o nível de procura (inventário) imposto pelo planeamento agregado, e o nível efetivamente obtido no planeamento detalhado. Uma discrepância significativa entre o valor obtido e a sua meta indica que está a ocorrer uma sobrestimação da

capacidade ao nível do planeamento agregado, levando à colocação de uma procura semanal superior ao que é possível executar.

A segunda, prende-se com a deteção da situação oposta: a subestimação da capacidade, com consequente agendamento de um nível de produção semanal inferior à capacidade da unidade produtiva. Assim sendo, é necessário avaliar o nível de utilização dos recursos disponíveis. Caso este seja baixo, depreende-se que um maior número de tarefas do que as inicialmente programadas poderia ter sido agendado. No entanto, é necessário ter em consideração que um tempo elevado de inatividade global dos recursos pode ser causado não só por falhas ao nível do processo de planeamento, mas também por questões ligadas ao balanceamento da linha produtiva. De forma a isolar o primeiro efeito na inatividade dos recursos, calcula-se a média de utilização dos recursos ao longo do horizonte, mas tendo em consideração, em cada período, apenas o recurso com o valor elevado de carga, ou seja, o *bottleneck* desse período.

Caso se detete que a desagregação da informação leva à obtenção de um plano insatisfatório a um nível inferior, devem efetuar-se modificações nos parâmetros do nível superior para o orientar no sentido da obtenção de uma solução que seja admissível a todos os níveis. Esta alteração, simbolizada na Figura 17 pela reação marcada a vermelho, envolve uma alteração nos tempos de processamento das operações, e deve ser comunicada neste passo, seguindo-se pela repetição dos passos anteriormente descritos.

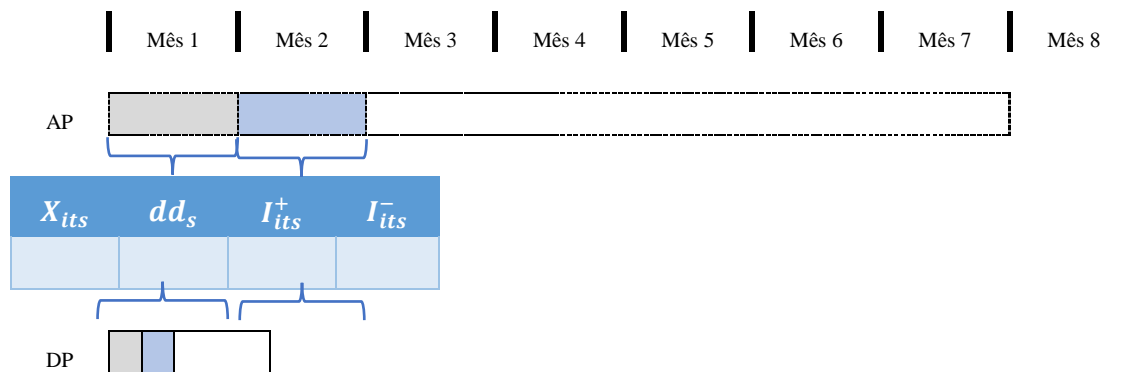


Figura 18 - Instrução na segunda iteração

4.3.2 Avanço do planeamento detalhado

A definição de uma periodicidade de revisão para o planeamento agregado de duas a quatro semanas, e de uma semana para o planeamento detalhado, implica que, por vezes, se pretenda executar o planeamento detalhado sem a execução prévia do planeamento agregado, dado que a última iteração para este último se manteria inalterada. Enquanto a um nível agregado a manutenção de *work-in-progress* entre semanas não é considerada, a um nível detalhado é essencial captar o estado da linha de produção nos momentos de transição entre iterações. Por esta razão, a implementação da semana anterior ao nível do planeamento detalhado é tomada em consideração para a construção do plano seguinte.

Tendo-se um horizonte correspondente a quatro semanas, e utilizando-se avanços de uma semana com cada iteração, ocorre sobreposição entre os horizontes obtidos em iterações sucessivas do planeamento detalhado. Por exemplo, tome-se a semana 4 do mês 1: esta é incluída no planeamento detalhado das quatro primeiras iterações, sendo apenas implementada após esta última. Nesta situação, torna-se necessário transmitir, entre iterações sucessivas do modelo de planeamento detalhado, quais as condições iniciais que se irão experienciar no final do período de avanço, aqui denominado por t_a . Estas incluem:

- Qual a quantidade de produto final que já foi executada, I_{its}^+ . Na nova iteração, impõe-se que esta quantidade seja alocada ao inventário inicial de produtos acabados, $I_{it_0s}^+$.
- Qual o *stock* de componentes intermédios, em armazenamento nos *buffers*, I_{jt_a} . Este será tomado como o inventário inicial para esses mesmos componentes, I_{jt_0} .
- Qual o *stock* de componentes intermédios, em carga nos equipamentos, cuja produção foi iniciada em t_{START} , um período anterior a t_a , mas cujo tempo de processamento significa que apenas estarão prontos após t_a , ou seja $t_{START} + td_j > t_a$.
 - Estas quantidades $r_j \cdot pb_j \cdot X_{jt}$, $t = t_a - LT, \dots, t_a$, que serão denominadas por $I_{jt_{START}}^*$, serão imputadas à restrição de inventário (4.20) da seguinte forma:

$$I_{j(t-1)} - I_{jt} + r_j \cdot pb_j \cdot X_{j(t-td_j+1)} + I_{j[t_a-(td_j-t)]}^* = \sum_{l \in suc(j)} a_{jl} \cdot pb_l \cdot X_{l(t+1)} + \sum_{m \in suc(j)} \sum_{s \in enc(m)} a_{jm} \cdot pb_m \cdot X_{m(t+1)s}, \forall j \in 1, \dots, N_j; t = 1, \dots, td_j \quad (4.38)$$

- Por outro lado, estando estas quantidades ainda a serem processadas, é necessário contabilizar a sua carga nas máquinas, ou seja, o termo $Cap_{jt}^* = \sum_{l \in work(k)} d \cdot up_k \left(\sum_{t_{START}=[t_a-(td_j-t)+2]}^{t_a} X_{lt} \right) + \sum_{l \in work(k)} p'_{lt} \cdot X_{l[t_a-(td_j-t)+1]}$ da restrição (4.23) deve ser contabilizado nos primeiros td_j de cada recurso no novo horizonte, na restrição (4.23):

$$\sum_{l \in work(k)} d \cdot up_k \left(\sum_{t'=t-td_j+2}^t X_{lt'} \right) + \sum_{l \in work(k)} p'_{lt} \left(\sum_{t'=t-td_j+1}^t X_{lt'} \right) + Cap_{jt}^* \leq up_k \cdot n_k \cdot d, \forall k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, td_j \quad (4.39)$$

Nota: LT corresponde ao *leadtime* máximo para uma operação e, assim sendo, o número dos períodos finais da semana passada cujas quantidades são utilizadas como *inputs* para construir a solução referente à semana presente. Caso se trate da primeira iteração do planeamento detalhado e não existam informações sobre quais os níveis de *WIP* que se iriam ter no início do horizonte, é necessário acrescentar antes do mesmo um número de períodos de planeamento extra de forma a que as máquinas não estejam em situação de *starvation*.

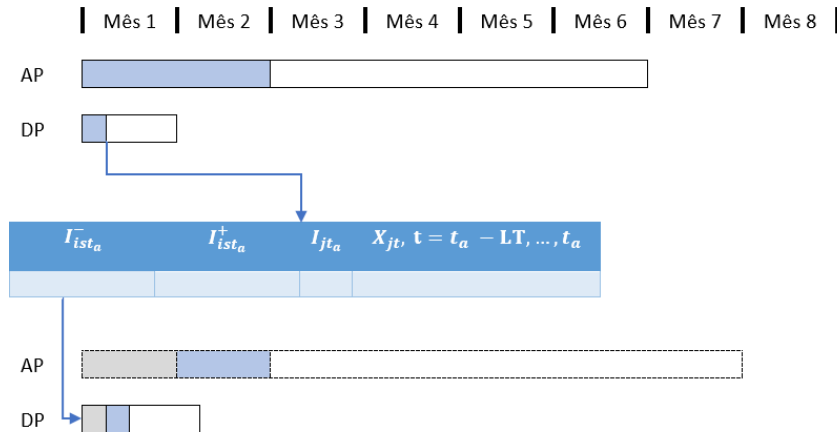


Figura 19 - Utilização da iteração anterior do planeamento detalhado como *input*

4.3.3 Reação

De acordo com a frequência de revisão definida para o nível agregado, o plano agregado inicialmente obtido será substituído por um novo, contendo potencialmente novas encomendas. Neste momento, o nível de produção prevista aquando da resolução do mês 1 no planeamento agregado é confrontado com o que se planeou/verificou ao nível do planeamento detalhado. Como mecanismo de controlo, sempre que o modelo superior é atualizado, as quantidades de produtos finais previstas para o mês implementado na última iteração são

substituídas por um inventário inicial proveniente da soma de todas as quantidades obtidas no modelo inferior durante o mesmo intervalo de tempo.

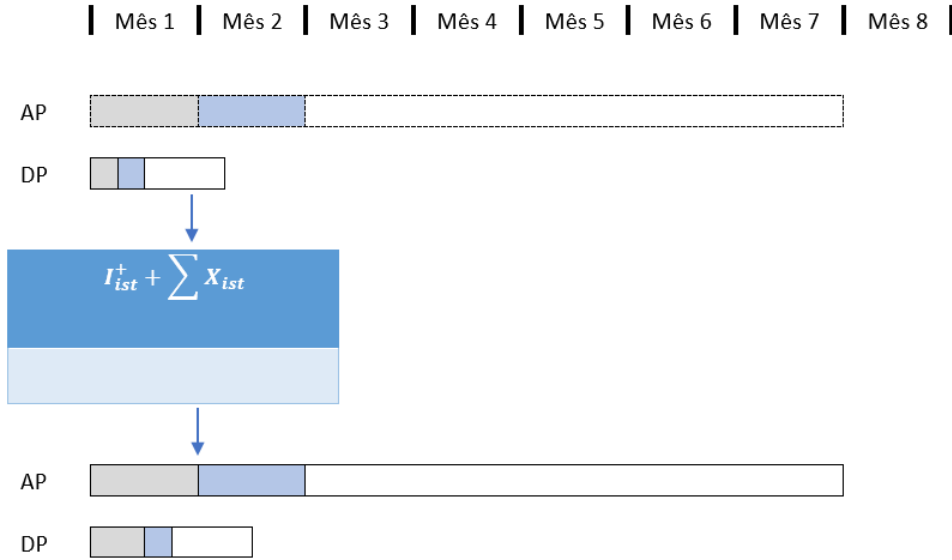


Figura 20 - Reação do nível detalhado para o nível agregado

4.4. Alteração dos tempos de processamento

A alteração dos tempos de processamento é, tipicamente, realizada tendo em consideração as perdas de tempo decorrentes do *setup*, não contabilizadas diretamente no modelo superior. Apesar do modelo atual não entrar com a existência de *setups*, existem algumas operações de agregação de lotes que levam a perdas de tempo produtivo e, conseqüentemente, de *throughput*. Assim sendo, ir-se-á empregar um tratamento homólogo para estas operações.

(Vogel, Almada-Lobo, and Almeder 2017) prova como é possível fazer esta alteração aos tempos de processamento, tornando os novos parâmetros uma ponderação entre o tempo de processamento variável e o tempo despendido na realização de *setups*. A expressão (4.40) apresenta uma versão simplificada da ponderação encontrada em (Vogel, Almada-Lobo, and Almeder 2017). Nesta expressão, p_{jk} corresponde ao tempo de processamento unitário do produto j , X_{jt} à quantidade produzida de j no período t , s_j ao tempo médio gasto com a operação de *setup* e Y_{jt} à variável inteira que marca se se procedeu a um *setup* para o produto j no período t .

É a parcela $s_j \cdot Y_{jt}$ que representa o incremento a implementar no tempo de processamento, sendo por sua vez ponderada pela quantidade total produzida, de forma a se obter um agravamento unitário.

$$p_{jk}^{NEW} = \frac{\sum p_{jk} \cdot X_{jt} + s_j \cdot Y_{jt}}{\sum X_{jt}} \quad (4.40)$$

Note-se que este novo tempo de processamento, a ser aplicado ao nível do *product type*, entra em consideração com os *setups* e quantidades referentes a todas as *product families* que o compõem. Não existindo diferenças em termos de agregação ao nível do produto entre os modelos implementados no planeamento agregado e detalhado no presente trabalho, torna-se necessário proceder a uma generalização de natureza homóloga: implementar os agravamentos a todos os produtos que tenham em comum a mesma operação com a existência de *setups*.

No entanto, esta abordagem apresenta uma dificuldade que se traduz em como transformar as perdas de tempo derivadas da agregação de quantidades, que, como observado nas condições (4.21)-(4.22), é variável, num tempo de *setup* fixo semelhante ao termo s_j presente na expressão (4.40)

A contabilização do tempo total de *setups* poderá ser feita da seguinte forma. O número de *setups* poderá ser entendido como o número de processos de agregação de material que ocorreram, ou seja, $\sum_t Y_{jt}$; o tempo decorrido por cada uma destas operações, como referido no Capítulo 4.2, seria no máximo o e_j da condição temporal que estaria associada aos componentes a montante desse passo. Assim, de uma forma simplista, pode-se assumir que o tempo máximo que pode ser perdido em *setups* corresponde a $\sum_{t=1}^T Y_{jt} \cdot \min_{l \in \text{pre}(j)}(e_l)$. No entanto, a imposição das quantidades mínimas é uma restrição *soft*, podendo esta ser violada. O balanceamento da linha é também um fator impactante neste tempo de espera: um *throughput* semelhante entre a operação em questão e a porção da linha a montante garantiria tempos de espera baixos, enquanto que se o *throughput* a montante fosse significativamente inferior ao *throughput* potencial da operação, os tempos de espera seriam maiores.

Caso isto aconteça, naturalmente o tempo de espera associado a cada agregação será tanto menor quanto maior a diferença entre a quantidade mínima recomendada para o número de lotes e a quantidade efetivamente produzida. Assumindo uma relação linear para esta dependência, uma estimativa do tempo total perdido numa dada operação poderia ser $\sum_{t=1}^T Y_{jt} \cdot \max_{l \in \text{pre}(j)}(e_l) \cdot [1 - (Y_{jt} \cdot ls_j - pb_j \cdot X_{jt})]$. Assim sendo, o agravamento que teria de ser colocado no tempo de processamento de uma dada operação seria:

$$\Delta p_{jk} = \frac{\sum_{t=1}^T Y_{jt} \cdot \min_{l \in \text{pre}(j)}(e_l) \cdot [1 - (Y_{jt} \cdot ls_j - pb_j \cdot X_{jt})]}{\sum_{t=1}^T X_{jt}} \quad (4.41)$$

5. Resultados

Os problemas foram resolvidos recorrendo ao *Gurobi Optimizer 7.0.2*, recorrendo à aplicação *Solver Studio* para o *Microsoft Excel*, que permite a construção dos modelos na linguagem *Python* e a sua posterior inserção no *software* da *Gurobi*. Os testes foram executados num computador pessoal *Hewlett Packard*. Com vista a testar os diferentes aspetos desenvolvidos nesta ferramenta, propuseram-se três cenários diferentes para a execução dos testes:

- Cenário 1: Planeamento hierárquico em horizonte rolante, com revisão bimensal do modelo tático, e aplicação do critério ELR/HP;
- Cenário 2: Planeamento hierárquico em horizonte rolante, com revisão mensal do modelo tático, e aplicação do critério ELR/HP;
- Cenário 3: Planeamento hierárquico em horizonte rolante, com revisão bimensal do modelo tático, e aplicação do critério ER/HP;

Com o primeiro cenário, para além de se ter uma solução de controlo contra a qual se poderia analisar o impacto das diferentes situações expressas nos outros cenários, procurou-se uma análise preliminar da qualidade do processo de desagregação do plano agregado. O segundo cenário prende-se com a análise de possíveis prejuízos que adviessem de uma revisão menos frequente do planeamento a médio prazo, quer pelo facto de novas encomendas não serem tão rapidamente tomadas em consideração, quer pelo confronto entre a produção planeada e a efetivamente executada no nível inferior ocorrer mais raramente. Por fim, o terceiro cenário visa analisar se uma maior rigidez, ao nível de cumprimento dos prazos acordados com o cliente, poderia conduzir a maiores dificuldades na concretização das encomendas colocadas.

De forma a comparar os cenários propostos, foi necessário, em primeiro lugar, construir uma instância que espelhasse as condições a que o planeamento seria sujeito na empresa-cliente. De seguida, impuseram-se os diferentes parâmetros e critérios de acordo com os diferentes cenários estipulados. Procedeu-se, depois, ao planeamento e implementação das quatro primeiras semanas do horizonte considerado, visando extrair-se, ao longo deste processo, indicadores de desempenho que pudessem corroborar ou contestar o funcionamento em planeamento hierárquico e em horizonte rolante, mas que também permitissem comparar os diferentes cenários apresentados.

Em todas as iterações, quer do modelo agregado, quer do modelo detalhado, foi imposto um limite ao tempo de execução de meia hora. Caso, no decorrer deste período não fosse encontrada a solução ótima, o algoritmo devolveria a melhor solução encontrada.

5.1. Parâmetros

A instância criada baseou-se na realidade evidenciada no caso de estudo apresentado no Capítulo 3. Neste sentido, foram obtidos os fluxos de produção de quatro produtos, cada um representativo de uma das quatro famílias de produtos: *DRAM*, *eMMC*, *eMCP* e *Flash*. No total, tomando também em consideração os fluxos dos componentes de incorporação, o fluxo de cada um destes produtos poderia envolver entre 30 a 50 operações. Destas, cerca de 5 a 7

seriam operações de cura, envolvendo a imposição de uma condição de quantidade mínima para o lançamento de novos lotes ao nível do planeamento detalhado.

De forma a simular um sistema JIT, a existência de WIP foi proibida em todas as *buffers* com a exceção de a jusante e a montante de operações em que ocorresse a agregação de lotes, bem como em operações de montagem de componentes provenientes de diferentes linhas. Impôs-se, também, um tempo máximo de espera de 4 horas para qualquer componente num *buffer*.

Foram usados cerca de 80 grupos de recursos produtivos para a execução das diferentes operações.

Em termos de procura de mercado, assumiu-se uma carteira inicial de 20 encomendas, distribuídas ao longo de um horizonte de 6 meses. No que respeita às quantidades, estas poderiam variar entre 200 000 e 800 000 unidades. Foi, ainda, assumido que a entrada de novas encomendas no sistema ocorreria no final da segunda semana de cada mês, estipulando-se que cada entrada envolveria 5 novas encomendas, distribuídas entre as diferentes famílias de produtos. A hierarquia de prioridades destas variou entre um nível máximo, de 1, e um nível mínimo, de 4.

Os parâmetros de produção impostos transversalmente a todos critérios estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros

h_i (AP e DP)	g_i (AP e DP)	f_j	h'_j	LT
1	2	$\min_{l \in pre(j)}(e_l) \cdot h_i$	1	2 dias

5.2. Cenário 1

Em primeiro lugar, procede-se à análise da *performance* do algoritmo de otimização face aos modelos colocados. Na Tabela 4, observa-se o resultado final obtido pelo algoritmo. Para todas as iterações realizadas ao nível do planeamento agregado, a otimalidade da solução é atingida, mas tal não é possível ao nível do planeamento detalhado. A Tabela 5, por sua vez, apresenta mais informações quanto a estes resultados. Por um lado, observa-se que a execução do planeamento agregado ocorre de forma quase instantânea. Por outro lado, apesar de 30 minutos não serem suficientes para resolver o modelo de planeamento detalhado até à otimalidade, verifica-se que o intervalo de programação inteira, entre a melhor solução obtida e o melhor limite encontrado, apenas na primeira iteração excede os 5%.

Em termos de execução do planeamento agregado, observa-se na Tabela 6 que, de uma carteira de 20 ordens de produção, 13 seriam executadas na sua totalidade e 2 parcialmente. Note-se que a não execução na totalidade das ordens de prioridade 3 implica a impossibilidade de produzir qualquer ordem de prioridade 4. Em suma, 66% de toda a quantidade agendada é produzida.

Observando a Figura 21, constata-se que os *leadtimes* para as diferentes ordens de produção são variáveis, encontrando-se entre uma a cinco semanas. É também interessante verificar que, ao passar a instrução para os primeiros dois meses do planeamento detalhado, apenas 3 das 13 encomendas irão figurar nestes planos: a SO-10, a SO-7 e a SO-9.

A nível de planeamento detalhado, observa-se, na Tabela 7, o cumprimento dos objetivos estabelecidos pela instrução do nível superior nas suas sucessivas iterações. Verifica-se que os níveis de procura se situaram acima dos 90 % das metas impostas, enquanto a utilização do equipamento mais carregado, o *bottleneck*, situou-se acima dos 95%.

Tabela 4 - Resultado da execução do algoritmo de otimização

Iteração	1	2	3	4	5
AP	Ótimo	-	Ótimo	-	Ótimo
DP	Limite de Tempo	Limite de Tempo	Limite de Tempo	Limite de Tempo	-

Tabela 5 - Dados de performance da execução do algoritmo de otimização

Iteração		1	2	3	4	5
AP	Tempo (s)	0,27		0,11		0,03
	Intervalo (%)	-		-		-
DP	Tempo (s)	1800	1800	1800	1800	
	Intervalo (%)	5,39%	2,98%	2,55%	1,92%	

Tabela 6 - Cumprimento das Encomendas

Encomendas	Data de entrega	Quantidade	Prioridade	Cumprimento
SO-1	11/12/2017	265674	1	100%
SO-6	29/11/2017	528614	1	100%
SO-9	10/09/2017	517884	1	100%
SO-13	07/09/2017	692823	1	100%
SO-18	22/10/2017	323274	1	100%
SO-11	10/11/2017	369769	2	100%
SO-7	03/10/2017	704655	2	100%
SO-15	12/10/2017	630946	2	100%
SO-4	14/10/2017	505011	2	100%
SO-19	27/10/2017	468744	2	100%
SO-10	08/10/2017	665743	3	100%
SO-16	29/11/2017	285610	3	100%
SO-8	17/10/2017	535193	3	61%
SO-2	25/10/2017	451680	3	100%
SO-5	19/09/2017	661508	4	0%
SO-12	24/09/2017	719103	4	0%
SO-17	11/11/2017	372413	4	0%
SO-3	20/11/2017	423430	4	0%
SO-14	01/11/2017	544151	4	0%
SO-20	19/10/2017	486989	4	0%
Total				66%

Tabela 7 - Cumprimento de objetivos a nível de planeamento detalhado

Iteração	1	2	3	4
Utilização de Capacidade	96,91%	97,44%	95,37%	96,05%
Cumprimento da Procura	90,65%	90,63%	96,08%	97,07%

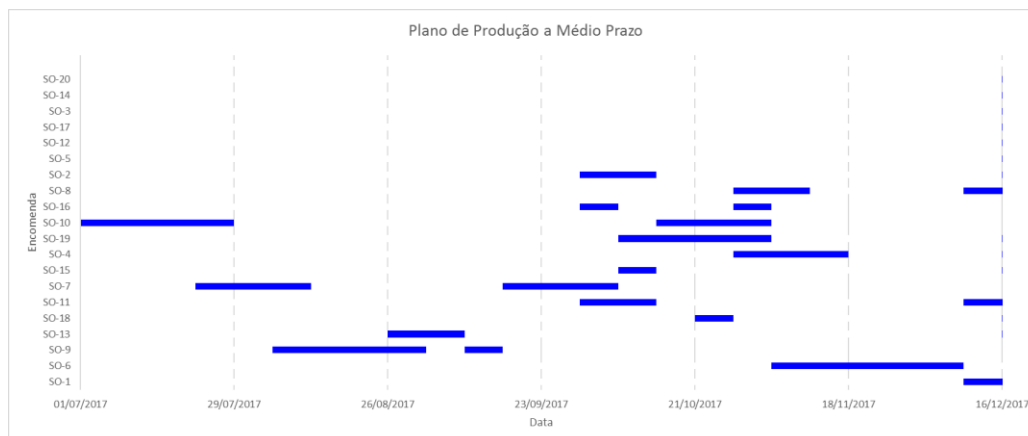


Figura 21 - Plano de Produção a Médio Prazo

5.3. Cenário 2

O Cenário 2 difere do Cenário 1 ao não realizar a revisão do planeamento agregado na segunda iteração. Consequentemente, os resultados obtidos para as duas primeiras iterações serão os mesmos que os obtidos para o Cenário 1. Por esta razão, torna-se pertinente verificar que resultados se obtêm do cumprimento das metas no planeamento detalhado, a partir de $t=2$, para ambos os cenários.

Observando a Tabela 8, verifica-se que, apesar de em termos de utilização de equipamentos críticos os dois cenários serem equiparáveis, no que concerne ao cumprimento da procura semanal, a revisão do modelo tático traz uma pequena melhoria ao cumprimento destas metas.

Tabela 8 - Comparação de cumprimento de objetivos entre os cenários 1 e 2

Iteração	Cenário 1		Cenário 2	
	3	4	3	4
Utilização de Capacidade	95,37%	96,05%	97,00%	96,27%
Cumprimento da Procura	96,08%	97,07%	92,99%	93,72%

Dado que no sistema de horizonte rolante proposto no presente relatório, apenas a primeira semana de cada iteração do planeamento detalhado é executada, é importante olhar para o cumprimento das metas desse período com especial atenção, dado que, ao contrário das restantes, já não serão revistas numa futura iteração de planeamento. Como se verifica na Tabela 9, os valores são em tudo semelhantes para a primeira semana de cada execução, levando a crer que só as ordens de produção mais afastadas do início do horizonte é que acabam por ser afetadas.

Nota-se, no entanto, o maior desvio no cumprimento das metas da primeira semana, que tende a ser colmatado nas semanas seguintes. Tal leva a ponderar que, talvez, o *leadtime* de 2 dias considerado para a obtenção do WIP inicial na linha de produção não seja o suficiente para os produtos considerados.

Tabela 9 - Cumprimento das metas de produção para a primeira semana de cada iteração do planeamento detalhado

Iteração	1	2	3	4
Cenário 1	82%	88%	91%	91%
Cenário 2	82%	88%	91%	92%

5.4. Cenário 3

Este cenário visa testar a robustez do modelo face a uma maior exigência no cumprimento dos prazos estabelecidos. Trata-se de uma preocupação suscitada, em particular, pela forma como as hierarquias foram definidas, bastando apenas uma ordem incompleta, de uma dada hierarquia, para que todas as suas subordinadas sejam inviabilizadas. Nesta conformidade, por exemplo, o lançamento de apenas uma encomenda de prioridade máxima sem o *leadtime* necessário para o seu cumprimento, poderia significar ignorar todas as restantes encomendas, mesmo que existisse a capacidade para as executar.

No entanto, como se constata pela análise da Tabela 10, a proibição de entregas em atraso para todas as encomendas resulta apenas numa perda marginal ao nível da procura satisfeita, passando-se de 66% para 64%. Nota-se, também, que uma das encomendas, SO-10, que pelo critério 1 era executada na sua totalidade, passa apenas a ter 75% da sua procura satisfeita.

Tabela 10 - Comparação entre a carteira de encomendas a executar no Cenário 1 e no Cenário 3

Encomenda	Prioridade	Cenário 1	Cenário 3
		% Cumprimento	% Cumprimento
SO-1	1	100%	100%
SO-6	1	100%	100%
SO-9	1	100%	100%
SO-13	1	100%	100%
SO-18	1	100%	100%
SO-11	2	100%	100%
SO-7	2	100%	100%
SO-15	2	100%	100%
SO-4	2	100%	100%
SO-19	2	100%	100%
SO-10	3	100%	75%
SO-16	3	100%	100%
SO-8	3	61%	44%
SO-2	3	100%	100%
SO-5	4	0	0
SO-12	4	0	0
SO-17	4	0	0
SO-3	4	0	0
SO-14	4	0	0
SO-20	4	0	0
Total		66%	64%

6. Conclusões e trabalho futuro

6.1. Trabalho Desenvolvido

A necessidade de alocação e do aproveitamento eficiente dos recursos é uma preocupação fundamental para indústrias em mercados altamente competitivos, como acontece na indústria dos semicondutores que “vive e morre em função de um simples credo: mais pequeno, mais rápido e mais barato” (“The Industry Handbook: The Semiconductor Industry” 2017). A pressão para reduzir custos operacionais e para o encurtamento dos ciclos de vida dos produtos, a par da necessidade de reduzir prazos de entrada no mercado e *leadtimes* de entrega, exige uma evolução dos processos produtivos no sentido de se tornarem mais reativos a estas volatilidades, e que deve desencadear a evolução do *software* de acompanhamento/gestão dos mesmos.

O presente projeto visou o desenvolvimento de um processo de planeamento num contexto de *Make-To-Order*, servindo como uma ferramenta de apoio tático a decisões de médio prazo, tais como a validação e aceitação de diferentes ordens de produção e a redefinição de datas de entrega. Este sistema foi construído com base num caso de estudo proveniente de uma empresa de semicondutores *backend*, mas almeja uma aplicabilidade mais abrangente, em consonância com a carteira e o perfil de clientes da Critical Manufacturing. Pelo que se acaba de expor, existiu o cuidado de manter informações relativas ao processo produtivo, nomeadamente, os recursos utilizados, a estrutura do processo, e os materiais empregues, como *inputs* variáveis, e dados como tempos de ciclo, *bottlenecks* e *throughputs*, como algo a não ser assumido *a priori*, emergindo estes da execução do sistema.

Uma das principais preocupações mencionadas foi a capacidade de uma empresa planear, com precisão, a sua capacidade de satisfazer a sua procura a médio prazo, quando um sistema *Make-To-Order* impõe restrições severas quanto à existência de almofadas, quer na forma de *stock*, quer na forma de uma antecipação excessiva da execução das ordens de produção. Por outro lado, o alargamento do conceito *Just-In-Time* à cadeia de abastecimento externo, a montante da empresa, implica também um esforço para que o *leadtime* entre a chegada de matérias-primas à empresa e a sua incorporação no produto seja o mais curto possível. Estes condicionalismos, quer internos, quer externos, ao nível da colocação de ordens de reabastecimento aos fornecedores, apontou para a insuficiência de um planeamento tático para responder às necessidades da empresa; sendo evidente a necessidade de incorporação, ao processo proposto, de uma vertente mais operacional, de execução do plano na linha de produção.

Partindo destas premissas, executou-se um sistema de planeamento hierárquico, como forma de articular a tomada de decisão a médio prazo com a determinação das condições necessárias para a implementação do plano obtido no *shop-floor*. Em primeiro lugar, a incorporação das condições e restrições operacionais no processo de planeamento permite obter-se um grau de detalhe necessário para retratar as situações anteriormente referidas. Seguidamente, a inclusão

de um nível de planeamento operacional permite, também, fazer o controlo e o aperfeiçoamento do planeamento ao nível tático, introduzindo nestas correções de forma a ter-se em consideração os efeitos não explicitados a este nível. Por fim, este nível intermédio é também um passo necessário para uma possível futura interligação entre o planeamento de produção agregado e o *master production scheduling*, abrindo portas a um sistema com um alcance mais alargado, desde o planeamento a médio prazo até à execução de cada tarefa no seu recurso respetivo.

A volatilidade, em termos da chegada e da colocação de ordens de produção, implica uma revisão frequente dos planos de produção, devendo, por isso, ser todo este processo incorporado numa estrutura de funcionamento dinâmica. O planeamento em horizonte rolante foi a estrutura utilizada, pois estabelece um balanço entre o planeamento numa janela temporal suficientemente grande, e uma implementação de apenas uma pequena parcela deste horizonte, favorecendo, assim, uma revisão mais frequente dos períodos planeados antes da sua execução. Tendo-se decidido enquadrar os dois modelos neste tipo de funcionamento, tornou-se fundamental equacionar os momentos críticos de trocas de informação, quer entre os níveis agregado e detalhado de planeamento, quer antes e após o rolamento do horizonte.

O funcionamento de sistemas hierárquicos tem inerentemente a possibilidade da existência de inadmissibilidades, quando ocorre a passagem de um nível mais agregado para um nível detalhado. Nesta sequência, é prioritário definir que *feedback* é necessário enviar ao nível superior, obtendo-se assim um plano agregado, cuja partição em horizontes mais pequenos para o nível detalhado resulta em planos admissíveis.

6.2. Resultados

Da análise de resultados foi possível visualizar-se que a metodologia seguida permitiu a obtenção de soluções ótimas, no caso do processo de planeamento agregado, e soluções próximas da otimalidade num intervalo de tempo limitado. Pode-se, por isso, assumir um bom grau de confiança nos planos obtidos, em termos da sua coerência com os modelos que foram propostos.

O planeamento agregado mostrou ser capaz de verificar, para uma carteira de encomendas semelhante à que existiria na empresa-cliente, a possibilidade de a concretizar. Caso isso não ocorresse, seria proposto um plano permitindo a cobertura do máximo da procura colocada, atendendo aos critérios impostos pelo utilizador.

O planeamento detalhado, para além da tarefa de determinar as necessidades de componentes externos e dos lotes de produção em cada operação, foi usado na capacidade de mecanismo de controlo das instruções provenientes do plano agregado. Verificou-se que o processo de desagregação deste último, com vista à realização do plano na linha de produção, não implicou desvios significativos das metas propostas.

6.3. Trabalho futuro

O presente projeto representa o primeiro ensaio na implementação de um sistema de planeamento de produção capaz de responder às exigências dos clientes da CMF. Por esta razão, o esforço realizado focou-se em incluir características estruturantes, que são transversais aos sistemas de planeamento, bem como certas especificidades tipicamente experienciadas por uma das indústrias que constitui o núcleo do mercado-alvo da CMF: a indústria de semicondutores. Torna-se, neste momento, pertinente refletir sobre que passos deveriam ser incluídos em esforços futuros.

Em primeiro lugar, os esforços mais prioritários prendem-se com uma validação mais rigorosa da ferramenta desenvolvida. Inicialmente, este processo poderá ser executado pela equipa de implementação, que poderá recolher dados fidedignos dos seus clientes e a análise e envio dos resultados obtidos aos mesmos, com vista a que estes possam dar o seu *feedback*. Numa fase mais avançada, a ferramenta poderá efetivamente ser colocada nas mãos de um conjunto de clientes, que poderão testar a ferramenta de forma independente e reportar que alterações gostariam de ver implementadas

Uma das variáveis excluídas, e cuja futura integração deveria ser considerada, é a existência de *setups*, pelo seu impacto, quer a nível de soluções obtidas, quer a nível da complexidade do modelo a ser resolvido. A forma como estes devem ser incluídos também é uma discussão interessante, e algo que depende da indústria em questão. Caso estes apresentem custos/perdas tão consideráveis que seja necessário a definição de períodos sazonais, em que apenas um número reduzido de *changeovers* por linha é permitido, a solução natural seria incluí-los explicitamente num nível de planeamento mais agregado do que se, por exemplo, as suas durações fossem mais reduzidas, permitindo a produção de um leque de produtos mais alargado. No entanto, esta última opção poderia, por sua vez, levantar a necessidade de considerar *setups* como dependentes da sequência, sugerindo a viabilidade de um modelo de *Lot-Sizing and Scheduling*.

A expansão da carteira de clientes para segmentos anteriormente não explorados como, por exemplo, a indústria de produção de cerâmicos, pode pôr em causa as simplificações assumidas no presente projeto. Fatores como a consideração de *setups*, a natureza estocástica da procura e a utilização de previsões a médio/longo prazo irão certamente tornar-se mais relevantes com um aumento da transversalidade da aplicação do *MES* e com o decorrente aumento do nível de exigência imposto ao processo de planeamento.

Uma volatilidade elevada nos *inputs* utilizados para a construção dos planos pode implicar uma variabilidade radical nos planos obtidos. A implementação de medidas que protejam o processo de planeamento contra este nervosismo será um passo fundamental para a conquista de credibilidade junto do cliente.

Outra questão por solucionar trata-se da interligação do sistema presente com o sistema de escalonamento nativo do *MES*, definindo quais os passos de antecipação, instrução e reação entre este e o nível de planeamento detalhado apresentado.

Uma futura comercialização de um sistema de planeamento de produção, integrado no *MES*, remete para uma nova preocupação: a *performance* do algoritmo de resolução. A este nível, foi empregue um algoritmo de otimização por métodos exatos, o *Gurobi*. Este provou ser capaz de obter uma solução para o modelo de planeamento agregado, mas o planeamento detalhado apresenta um desafio maior, não sendo possível atingir a solução ótima dentro do limite de tempo estabelecido, ficando-se pela apresentação da melhor solução atingida. Por outro lado, a incorporação de *software* externo à empresa num produto a ser comercializado poderia levantar objeções a nível de estratégia empresarial e de legalidade. Por estas duas razões, os próximos passos passariam pela aplicação de métodos baseados em meta-heurísticas para a resolução dos modelos propostos, visando-se a obtenção de uma solução de boa qualidade num espaço de tempo que torne a ferramenta competitiva.

Referências

- Almada Lobo, Bernardo (Feup). 2005. “Planeamento E Escalonamento Da Produção - Visão Global E Caso de Estudo.”
- Barbarosoglu, Gülay, and Linet Özdamar. 2000. “Analysis of Solution Space-Dependent Performance of Simulated Annealing: The Case of the Multi-Level Capacitated Lot Sizing Problem.” *Computers and Operations Research* 27 (9): 895–903.
- Beck, Fabian G., Eric H. Grosse, and Ruben Teßmann. 2015. “An Extension for Dynamic Lot-Sizing Heuristics.” *Production & Manufacturing Research* 3 (1). Taylor & Francis: 20–35.
- Berretta, Regina, and Luiz Fernando Rodrigues. 2004. “A Memetic Algorithm for a Multistage Capacitated Lot-Sizing Problem.” *International Journal of Production Economics* 87 (1): 67–81.
- Chen, Chin Sheng, Siddharth Mestry, Purushothaman Damodaran, and Chao Wang. 2009. “The Capacity Planning Problem in Make-to-Order Enterprises.” *Mathematical and Computer Modelling* 50 (9–10). Elsevier Ltd: 1461–73.
- Clark, Alistair R. 2003. “Optimization Approximations for Capacity Constrained Material Requirements Planning.” *International Journal of Production Economics* 84 (2): 115–31.
- Florian, M., JK Lenstra, and AHG Rinnooy Kan. 1980. “Deterministic Production Planning: Algorithms and Complexity.” *Management Science* 26 (7). INFORMS: 669–79.
- França, Paulo M., Vinícius A Armentano, Regina E. Berretta, and Alistair R Clark. 1997. “A Heuristic Method for Lot-Sizing in Multi-Stage Systems.” *Computers & Operations Research* 24 (9): 861–74.
- Gicquel, C, M Minoux, and Y Dallery. 2008. “Capacitated Lot Sizing Models: A Literature Review.”
- Graves, SC. 1999. “Manufacturing Planning and Control.” *Massachusetts Institute of Technology*.
- Guimarães, Luis. 2015. “Rolling Horizon Formulations for Short-to-Medium Term Production Planning.”
- Mönch, Lars, John W. Fowler, and Scott J. Mason. 2013. *Production Planning and Control for Semiconductor Wafer Fabrication Facilities: Modeling, Analysis, and Systems*.
- Pochet, Y. 2001. “Mathematical Programming Models and Formulations for Deterministic Production Planning Problems.” *Computational Combinatorial Optimization*.
- Schneeweiß, Christoph. 1995. “Hierarchical Structures in Organisations: A Conceptual Framework.” *European Journal of Operational Research* 86 (1): 4–31.

- Sethi, S, and G Sorger. 1991. "A Theory of Rolling Horizon Decision Making." *Annals of Operations Research*.
- Sivakumar, Appa Iyer, and Chin Soon Chong. 2001. "A Simulation Based Analysis of Cycle Time Distribution, and Throughput in Semiconductor Backend Manufacturing." *Computers in Industry* 45 (1): 59–78.
- Stadtler, Hartmut. 2003. "Multilevel Lot Sizing with Setup Times and Multiple Constrained Resources: Internally Rolling Schedules with Lot-Sizing Windows." *Operations Research* 51 (3). INFORMS: 487–502.
- "The Industry Handbook: The Semiconductor Industry." 2017. Accessed June 7. <http://www.investopedia.com/features/industryhandbook/semiconductor.asp>.
- Vicens, E, M.E Alemany, C Andrés, and J.J Guarch. 2001. "A Design and Application Methodology for Hierarchical Production Planning Decision Support Systems in an Enterprise Integration Context." *International Journal of Production Economics* 74 (1–3): 5–20.
- Vogel, Tom, Bernardo Almada-Lobo, and Christian Almeder. 2017. "Integrated versus Hierarchical Approach to Aggregate Production Planning and Master Production Scheduling." *OR Spectrum* 39 (1). Springer Berlin Heidelberg: 193–229.
- Wagner, Harvey M., and Thomson M. Whitin. 1958. "Dynamic Version of the Economic Lot Size Model." *Management Science* 5 (1). INFORMS: 89–96.
- Xie, Jinxing, and Jiefang Dong. 2002. "Heuristic Genetic Algorithms for General Capacitated Lot-Sizing Problems." *Computers & Mathematics with Applications* 44 (1–2): 263–76.

ANEXO A: Cenário 1 - Instrução

Tabela 11 - Instrução emitida pelo planeamento agregado na iteração 1

Encomenda	Semana	Meta	Prioridade	Data	Quantidade
SO-9	6	Inventário	1	12/08/17	10232
SO-9	7	Inventário	1	19/08/17	137817
SO-9	8	Inventário	1	26/08/17	265401
SO-7	4	Inventário	2	29/07/17	117071
SO-7	5	Inventário	2	05/08/17	244655
SO-7	6	Inventário	2	12/08/17	362007
SO-7	7	Inventário	2	19/08/17	362007
SO-7	8	Inventário	2	26/08/17	362007
SO-10	1	Inventário	3	08/07/17	127584
SO-10	2	Inventário	3	15/07/17	255168
SO-10	3	Inventário	3	22/07/17	382753
SO-10	4	Inventário	3	29/07/17	393266
SO-10	5	Inventário	3	05/08/17	393266
SO-10	6	Inventário	3	12/08/17	393266
SO-10	7	Inventário	3	19/08/17	393266
SO-10	8	Inventário	3	26/08/17	393266

Tabela 12 - Instrução emitida pelo planeamento agregado na iteração 3

Encomenda	Semana	Meta	Prioridade	Data	Quantidade
SO-10	1	Inventário	3	08/07/17	127584
SO-10	2	Inventário	3	15/07/17	255168
SO-10	3	Inventário	3	22/07/17	382753
SO-10	4	Inventário	3	29/07/17	393266
SO-10	5	Inventário	3	05/08/17	393266
SO-10	6	Inventário	3	12/08/17	393266
SO-10	7	Inventário	3	19/08/17	393266
SO-10	8	Inventário	3	26/08/17	393266
SO-7	4	Inventário	2	29/07/17	117071
SO-7	5	Inventário	2	05/08/17	205147
SO-7	6	Inventário	2	12/08/17	322499
SO-7	7	Inventário	2	19/08/17	322499
SO-7	8	Inventário	2	26/08/17	322499
SO-9	6	Inventário	1	12/08/17	10232
SO-9	7	Inventário	1	19/08/17	137817
SO-9	8	Inventário	1	26/08/17	265401

ANEXO B: Cenário 1 - Reação

Tabela 13- Reação emitida pelo planeamento detalhado na iteração 2

Encomendas	Inventário	Backlog
SO-7	77563	0
SO-10	393266	0

Tabela 14 - Reação emitida pelo planeamento detalhado na iteração 4

Encomendas	Inventário	Backlog
SO-9	0	0
SO-7	74701	0
SO-10	393266	0

ANEXO C: Fluxograma de operação da ferramenta de planeamento

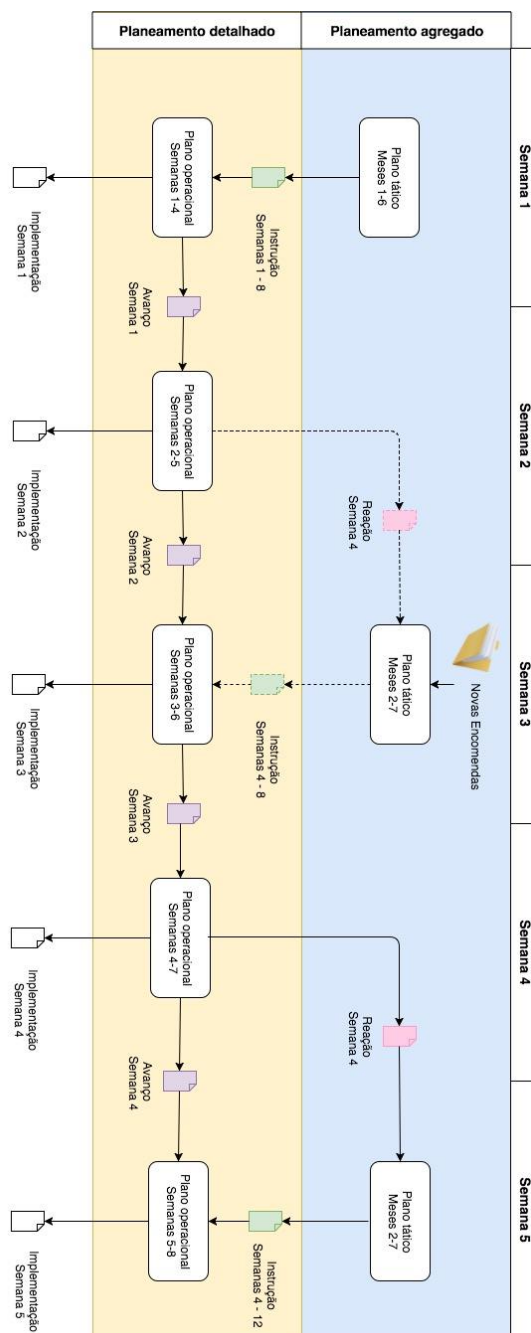


Figura 22 - Fluxograma de funcionamento da ferramenta de planeamento

